

地質 - 0267

見 本

地下水流動保全工法マニュアル

(試 案)

2001年2月

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に関する研究委員会

地下水流動保全工法マニュアル

(試案)

2001年2月

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に関する研究委員会

序

今年から21世紀が始まったが、これからの新しい100年に社会資本の整備はどうあるべきかと考えたとき、環境問題の解決というキーワードが浮かんでくる。地球規模では人口爆発などによる温暖化や砂漠化であり、これらを解決するためには建設工事のミティゲーションが必要となってくる。

前半世紀をみるとわが国の社会資本の整備は戦後荒廃のゼロから出発し、高度成長を遂げ、面的には一応の水準に達したと考えられてはいるが、課題としては生態あるいは景観的な環境問題が発生した。これらを解決するための方法のひとつとして地下構造物の建設が増え、とくに都市部を中心に土地の有効利用の面からもより深い位置に建設されるようになった。

また、法制面からも平成9年に大規模建設事業に環境アセスメントが義務付けられる一方、平成12年に大深度地下利用の法律が制定され、地下への構造物に関心が高まった。

しかしながら、地下で構造物を築造した場合には新たな環境問題が発生する。それは地盤環境の変化、すなわち井戸水の枯渇、水質汚染、地盤や構造物の変形や植物などの生態系への影響などが考えられる。このような地下構造物などが原因となる地下水流動阻害にたいして、地下水の流動を保全するための対応策や工法が発生現場毎に考えられてきた。

このように地下水流動保全の問題もミティゲーションのひとつとして考えられてきたが、いままで障害問題が発生するたびにそれぞれ処理されてきた関係上、統一された考え方や確立された手法がなかった。そして全国で独自の対処法が出てきたのである。

これらの問題を整理することで、普遍的な調査、解析の方法すなわちマニュアルのようなものが見つけられないかという目的で、地下水流動保全についての研究者、調査設計に関わっている者、実際の施工関係者など産・官・学あわせたメンバーに集まってもらい「地下水地盤環境に関する研究協議会」の分科会として研究委員会を発足させた。

そして、まず全国の施工事例の収集、調査からはじめた。約3年にわたる活動の結果、地下水流動阻害の状況や調査・設計方法、施工からメンテナンスにいたる地下水流動保全工法に関する考え方を収集、分析し、系統的に整理することで出来あがったものが当マニュアル（試案）である。その結果として自讃ながらもある程度評価できるものになったのではないかと考えている。

この冊子がまとめたのは当委員会に関係する方々の力ばかりでなく、これからの建設工事がどうあるべきかを試行錯誤されている全国の方々の応援があったことについて感謝する次第である。このテキストは現在試案として発表させていただくが、まだまだ不備な点や解決されていない事柄も多く、補足や修正する箇所もあると思われるので、忌憚のない意見を聞かせて欲しいものである。

また、ここに本委員会のメンバーを紹介しておく。

地下水流動保全工法に関する研究委員会
委員長 丹原 光隆

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に関する研究委員会 委員および幹事名簿

会 務	ワーキング	氏 名	所 属
委員長		丹原 光隆	(株)阪神コンサルタンツ
副委員長 ／WG 長	調査・設計	西垣 誠	岡山大学 環境理工学部
幹 事	調査・設計	安藤 喜明	(株)オキコ コーポレーション
委 員		今井 範雄	国土交通省近畿地方整備局
委 員	施工・メンテ	大前 博	大成建設(株)
委 員		緒方 隆哉	福岡市交通局
委 員	調査・設計	高坂 信章	清水建設(株)
幹 事	施工・メンテ ／調査・設計	小里 隆孝	(株)建設企画コンサルタント
委 員	調査・設計	小松 郁夫	阪神高速道路公団
委 員		坂山 安男	日本道路公団
幹 事	施工・メンテ	佐藤 常雄	(株)錢高組
幹事長代理	調査・設計	進士 喜英	(株)鴻池組
委 員	調査・設計	杉村 孝雄	神戸市交通局
委 員	施工・メンテ	杉本 隆男	東京都土木技術研究所
委 員	調査・設計	大東 憲二	大同工業大学 工学部
委 員	施工・メンテ	中澤 貴志	五洋建設(株)
委 員	調査・設計	並川 賢治	首都高速道路公団
幹 事	調査・設計	野田 和良	(株)東京建設コンサルタント
幹事長	調査・設計	橋本 正	(財)地域 地盤 環境 研究所
委 員	調査・設計	濱手 慎也	パシフィックコンサルタンツ(株)
委 員	調査・設計	松田 義則	八千代エンジニアリング(株)
委 員	調査・設計	宮川 純一	川崎地質(株)
幹事/WG 長	施工・メンテ	山内 英治	(株)大林組
委 員	施工・メンテ	渡辺 幹広	鹿島建設(株)
旧委員		小林 育夫	(株)鴻池組
旧委員		坂本 佳一	(株)錢高組技術研究所
旧委員		藪田 英俊	大成建設(株)
旧委員		吉岡 祐仁	大成建設(株)

旧委員所属は委員会在任時

ワーキング名：調査・設計(調査・設計ワーキング)

施工・メンテ(施工・メンテナンスワーキング)

目 次

序

1. 地下水流動保全	1- 1
1.1 地下建設を取り巻く現状	1- 1
1.2 地下構造物の地下水に対する影響と被害	1- 1
1.3 地下水流動保全工法について	1- 5
1.4 マニュアル(試案)の構成	1- 6
2. 調査マニュアル	2- 1
2.1 調査方針	2- 1
2.1.1 調査と環境	2- 1
2.1.2 調査の目的	2- 4
2.1.3 調査の進め方	2- 5
2.2 調査範囲	2- 7
2.2.1 調査範囲の考え方	2- 7
2.2.2 調査範囲の目安	2- 8
2.3 事前調査	2-13
2.3.1 文献調査	2-13
2.3.2 法的規制調査	2-20
2.3.3 詳細調査の計画	2-22
2.4 本調査	2-24
2.4.1 水文調査	2-27
2.4.2 地表踏査	2-30
2.4.3 周辺井戸調査	2-33
2.4.4 ボーリング調査	2-36
2.4.5 地下水位調査	2-38
2.4.6 地下水流動調査	2-40
2.4.7 帯水層調査	2-44
2.4.8 水質調査	2-49
2.4.9 目詰まり評価のための調査	2-50
2.5 周辺環境調査	2-52
2.5.1 地盤調査	2-53
2.5.2 植生調査	2-64
2.5.3 構造物調査	2-68
2.6 影響評価	2-72
2.6.1 影響評価の概要	2-72
2.6.2 影響評価基準設定の考え方	2-75
2.6.3 影響評価のための計算法の概要	2-76

2.6.4 計算法	2-81
参考文献	2-94
【参考】構造物種類別許容変位量	2-97
 3. 設計マニュアル	 3- 1
3.1 対策工法の基本的な考え方	3- 1
3.2 設計フロー	3- 2
3.3 対策工法選定のポイント	3- 4
3.3.1 帯水層と構造物の関係	3- 4
3.3.2 対策工法の方式分類	3- 5
3.3.3 対策工の施工時期	3- 8
3.3.4 集水・涵養方式と通水方式の組み合わせと選定	3- 9
3.4 評価基準	3-10
3.5 対策工の設計項目	3-12
3.6 設計計算	3-14
3.6.1 設備設計のフロー	3-14
3.6.2 基本的な検討項目	3-15
3.6.3 計算法の概要	3-17
3.7 計算法	3-18
3.7.1 限界流速に基づく設計計算(最大設置ピッチの設定)	3-19
3.7.2 数値計算法	3-23
3.7.3 井戸型施設の計算法(1)	3-25
3.7.4 井戸型施設の計算法(2)	3-34
3.7.5 集水涵養機能付壁施設	3-43
3.7.6 水平/斜めボーリング施設	3-44
3.7.7 面型の集水・涵養装置の設計	3-47
3.7.8 通水部の設計	3-49
3.7.9 照査ポイントの水位変動予測	3-51
3.8 目詰まりの設計への反映	3-52
3.8.1 目詰まりの種類	3-52
3.8.2 目詰まりと性能の関係	3-53
3.8.3 長期的目詰まりの設計への反映	3-54
参考文献	3-56

4. 施工・メンテナンス	4- 1
4.1 地下水流動対策工法	4- 1
4.1.1 地下水流動保全対策工法の選定	4- 1
4.1.2 対策工法の留意点	4- 3
4.1.2.1 土留め壁施工法とその留意点	4- 3
4.1.2.2 通水井施工法とその留意点	4- 4
4.2 施工事例の検討	4- 6
4.2.1 施工事例の紹介	4- 6
4.2.2 施工事例にみる問題点と課題	4-47
4.3 メンテナンス	4-51
4.3.1 メンテナンスの考え方	4-51
4.3.2 通水施設の目詰まり要因とその対策	4-53
4.3.3 通水施設の試験・計測・管理	4-55
4.3.4 計測事例	4-58

おわりに

巻末資料 地下水流動保全工法の紹介	資料-1
-------------------	------

1. 地下水流動保全

1.1 地下建設を取り巻く現状

我が国の都市部におけるインフラ整備は、高度経済成長期からの土地価格の高騰により高度利用が進み、公共用地（主に道路）の地下に数多く築造されてきた。近年、新たな地下構造物の建設は、既設の構造物を避けるためより深い位置に建設しなければならないケースが多くなって来ている。この要求に対して建設技術の著しい発展により建設可能となり、その深度も益々深くなる傾向にある。しかし、これに伴い建設費の増大や周辺に対する建設時の影響により見直しの議論が起こり始めた。平成12年5月には土地の私的所有の原則により今まであまり利用されることがなかった民地部の地下部において、一部所有の制限を設け土地の有効利用を図ろうとする大深度地下利用の法律が制定されるに至った。また、これ以前の平成9年には、大規模な建設事業において周辺環境に対する影響について環境影響評価が義務づけられよう国の基準として法律が制定された。これをきっかけに、今後一層の地下利用が促進され地下構造物の建設が増加するものと思われる。一方、土地の有効利用の地下利用以外の面でも騒音・振動・大気汚染等の周辺環境や景観上の配慮のため地下に計画されるケースが増える。この傾向は都市部周辺や地方にまで及んでいる。

地下構造物の施工法は一般的に開削工法、シールド工法およびNATM工法によることが多い。最近、鉄道、下水道および電気通信設備等のように線状の深度が深い地下構造物の施工法は、各分野のトンネル技術の目覚ましい発展によりシールド工法が採用されることが多くなって来ている。しかし、鉄道の駅部や道路のように大断面の構造、道路の掘り割り構造やトンネルへのアプローチなどを築造する場合は、開削工法が採用されるケースが多くある。

1.2 地下構造物の地下水に対する影響と被害

開削工法においては、掘削中周辺の土砂崩壊の防止と地下水の遮水のため躯体構造物より深くまで築造される土留め壁は、ほとんどの場合工事完了後構造物とともに地中に残置される。特に、鉄道や道路等のように長大線状構造物が開削工法で建設されると、躯体構造物と残置された土留め壁が従前の地下水流に広範囲に大きな影響を与える。その影響は従来の工事中的の問題でなく、完成後長期間におよぶことと広範囲にわたることが大きな特徴である。

地下水流動に直接的に与える現象は以下のとおりである。

- ① 地下水流の動水勾配の変動による水量と水位が変化する。
- ② 構造物に対し、地下水流の上流側の地下水位が上昇する。（ダムアップあるいは堰上げ現象）
- ③ 反対の地下水流の下流側は地下水位が低下する。（ダムダウンあるいは堰止め現象）
- ④ 構造物が新たに出来たため水みちがこの構造物に沿って流れたり端部では回り込み。

その結果、工事の段階からは地下水利用への影響、水圧増大による構造物の変状や漏水が生じ、長期的には、土の強度の変化による地盤変状、植物や生物など生態系への影響、水質の変化など多岐にわたり発生する恐れがある。これらを整理すると表 1.2.1 のとおりである。その状況を包括的にイメージ化をすると図 1.2.1 のようになる。

表 1.2.1 地下水流動阻害による影響

地下水の変化 事象	地下水位、動水勾配および水みちの変化	
	上流側の水位上昇	下流側の水位低下
1. 地下水利用	・揚水ポンプの故障	・井戸枯れ ・揚水枯渇
2. 地下水質	・滞留による水質の低下	・塩水化
3. 地盤環境	・地盤の湿潤化 ・液状化の可能性の増大	・地盤沈下
4. 構造物	・浮力の増大 ・地下漏水の増大	・間隙水圧の低下による沈下
5. 生態系	・腐れによる樹木の被害 ・地中生物への影響	・樹木の立ち枯れ ・水生生物への影響

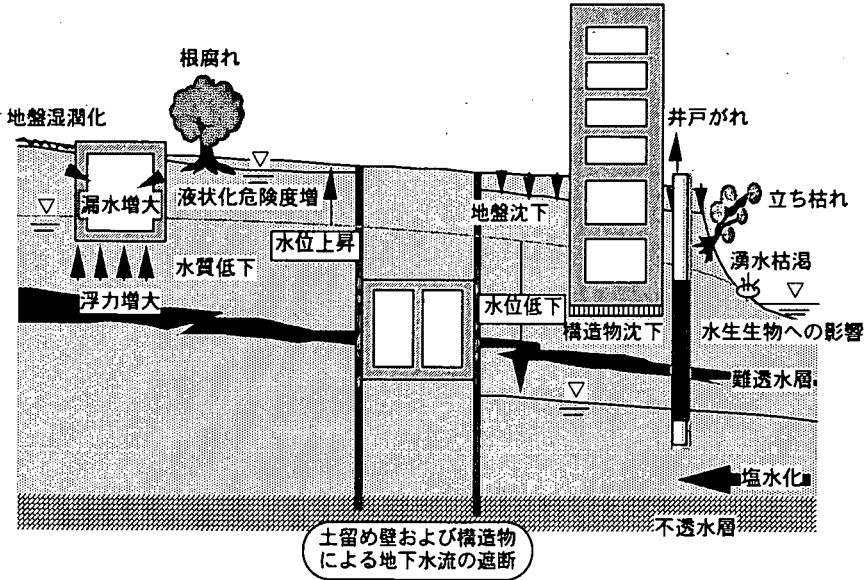


図 1.2.1 地下水流の遮断により生じる問題のイメージ

また、地下水位の変化による具体的な影響や被害を事例を図 1.2.2、1.2.3 に示す。

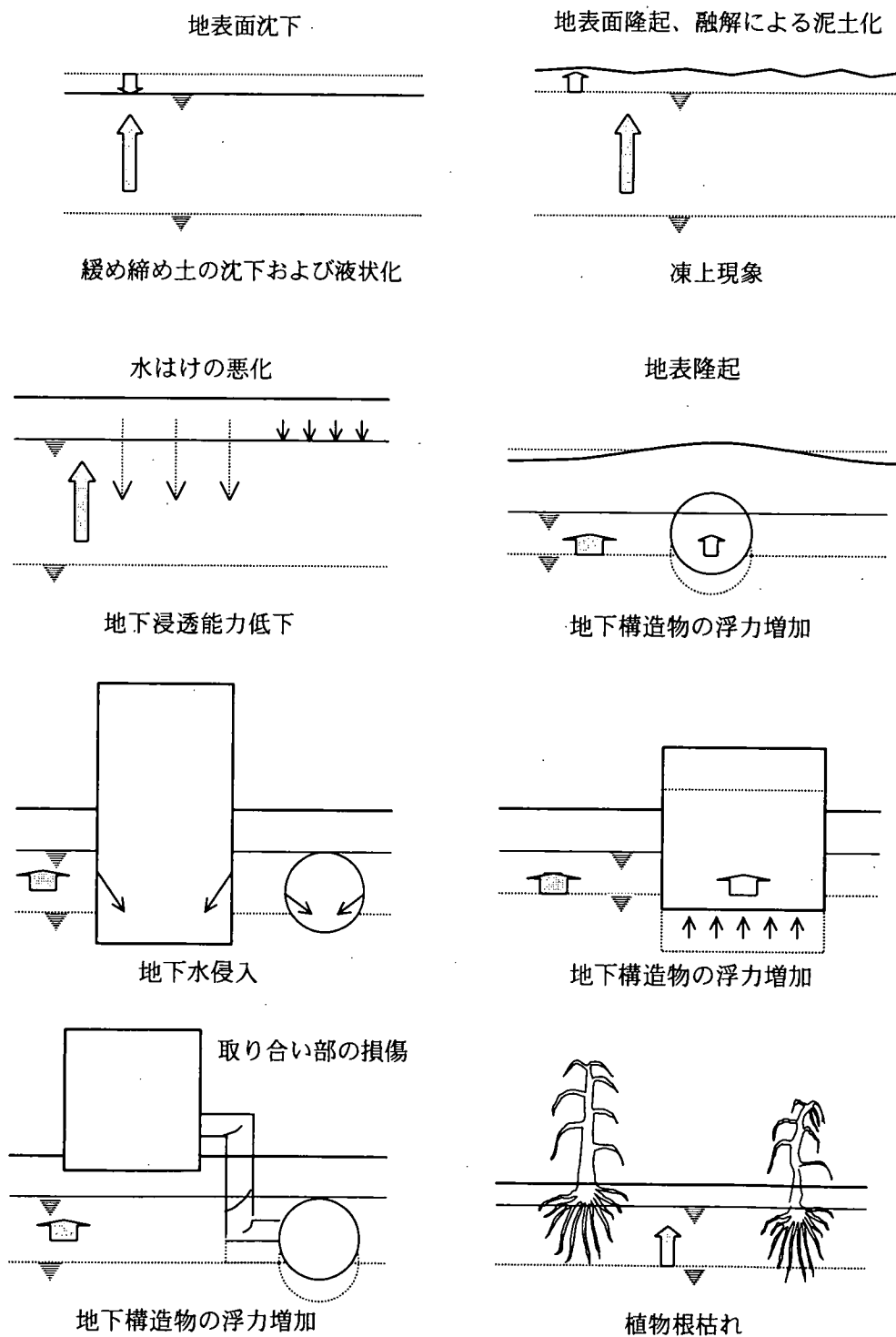
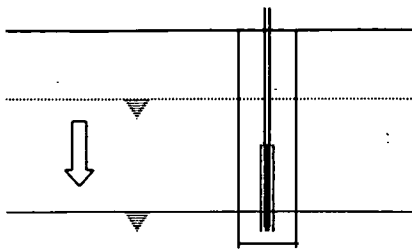
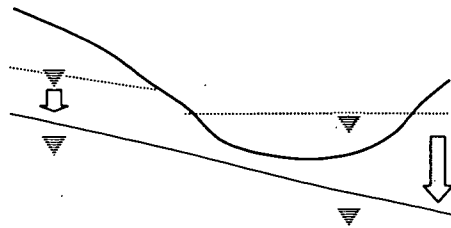


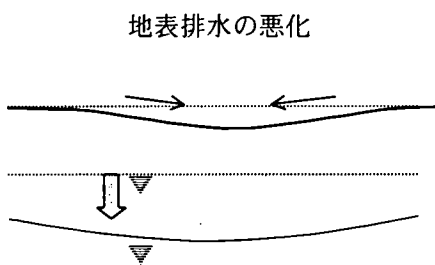
図 1.2.2 地下水位上昇による被害例



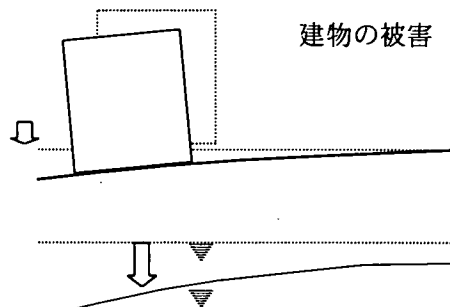
既設井戸の揚水能力低下



湧水、湖沼の水位低下



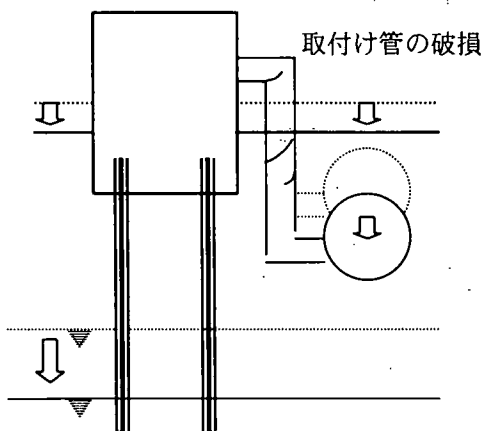
地表排水の悪化



建物の被害

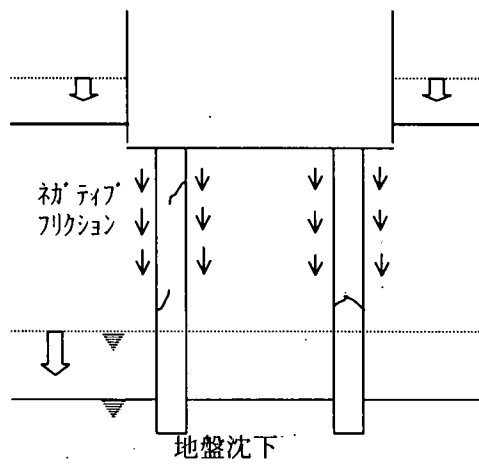
地盤沈下

地盤沈下



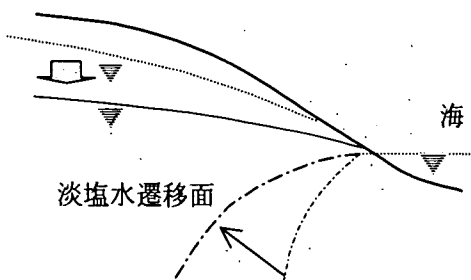
取付け管の破損

地盤沈下



初タイプ
フリクション

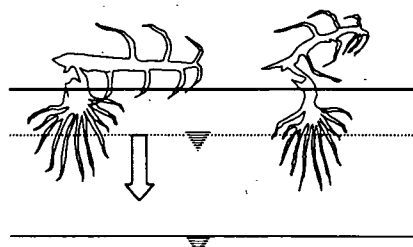
地盤沈下



淡塩水遷移面

海

塩水化



植物枯れ

図 1.2.3 地下水位低下による被害例

建設計画に当たり、地下水流動の阻害されたことによりどのような影響と被害が発生するか予測と評価をする事が重要になって来る。

1.3 地下水流動保全工法について

地下水流動保全工法は、地下水流動阻害の問題を回避する方法として、構造物や土留めを構築した後においても地下水の流れを確保するため、遮断された地下水流を構造物や土留めの上流側の帯水層で地下水を集水し、構造物や土留めの部分は何らかの方法により地下水を通水させ下流側の地盤へ地下水を流す工法である。

その仕組みは、遮断された帯水層の上流側で地下水を集水して（取水）、構造物部分をパイプなどを用い通過させ（通水）、構造物下流側の地盤中に地下水を還元する（涵養）ものである。その概念図を図 1.3.1 に示す。

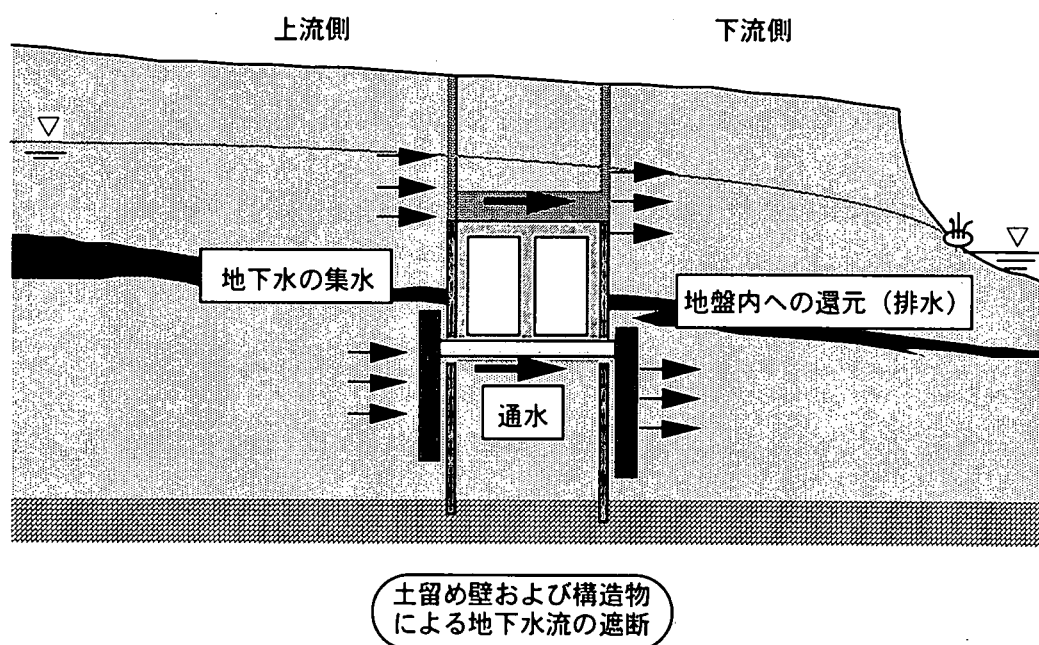


図 1.3.1 地下水流動保全工法の概念図

過去の事例では各工事毎に問題が発生してから対症療法的に試行錯誤しながら実施されたものが多く、計画段階から系統的に検討されたものは少ない。また、実施後長期間にわたって効果が得られたかどうか検証されたケースもほとんどない。

このように工法の構成要素としては単純な仕組みであるが、工法適用においては今後解決すべき課題が多く残されている。

そこで、工法検討するうえでの課題と問題点を列挙すると以下の通りである。

- ・調査・設計・施工・メンテナンスにわたる全体としてのシステムの検討手法が確立されていない。
- ・調査においては広範囲で3次元的な地盤および地下水情報が得られにくい。
- ・影響評価においては指標、許容値、解析モデルの選定がむずかしい。特に概略的な評価を行うための簡易な解析方法が無い。また、評価基準を決定するにあたっては、第三者（周辺の住民）への説明と合意形成に時間と労力がかかる。
- ・設計施工の面では、土留め壁は施工時には止水性を求められ、施工後は地下水流動保全の面から透水性が要求されように相反する性能を持つ技術の開発が遅れている。
- ・工法採用後の長期的なその効果と確認が難しい（費用、時間）。

1.4 マニュアル（試案）の構成

今後、地下構造物の建設計画において、地下水や地盤環境の保全の面から地下水流動保全工法を採用されるケースが増加し、この工法が施工技術の中で重要な工法のひとつ位置を占めるようになる。前述の課題を解決するため、過去の施工事例を収集分析し、問題点を明らかにし、調査・設計・施工の各段階で検討方法とその内容についてまとめたものが本マニュアル（試案）である。

工法検討の手順するうえでの基本的な検討フローを図 1.4.1 に示す。

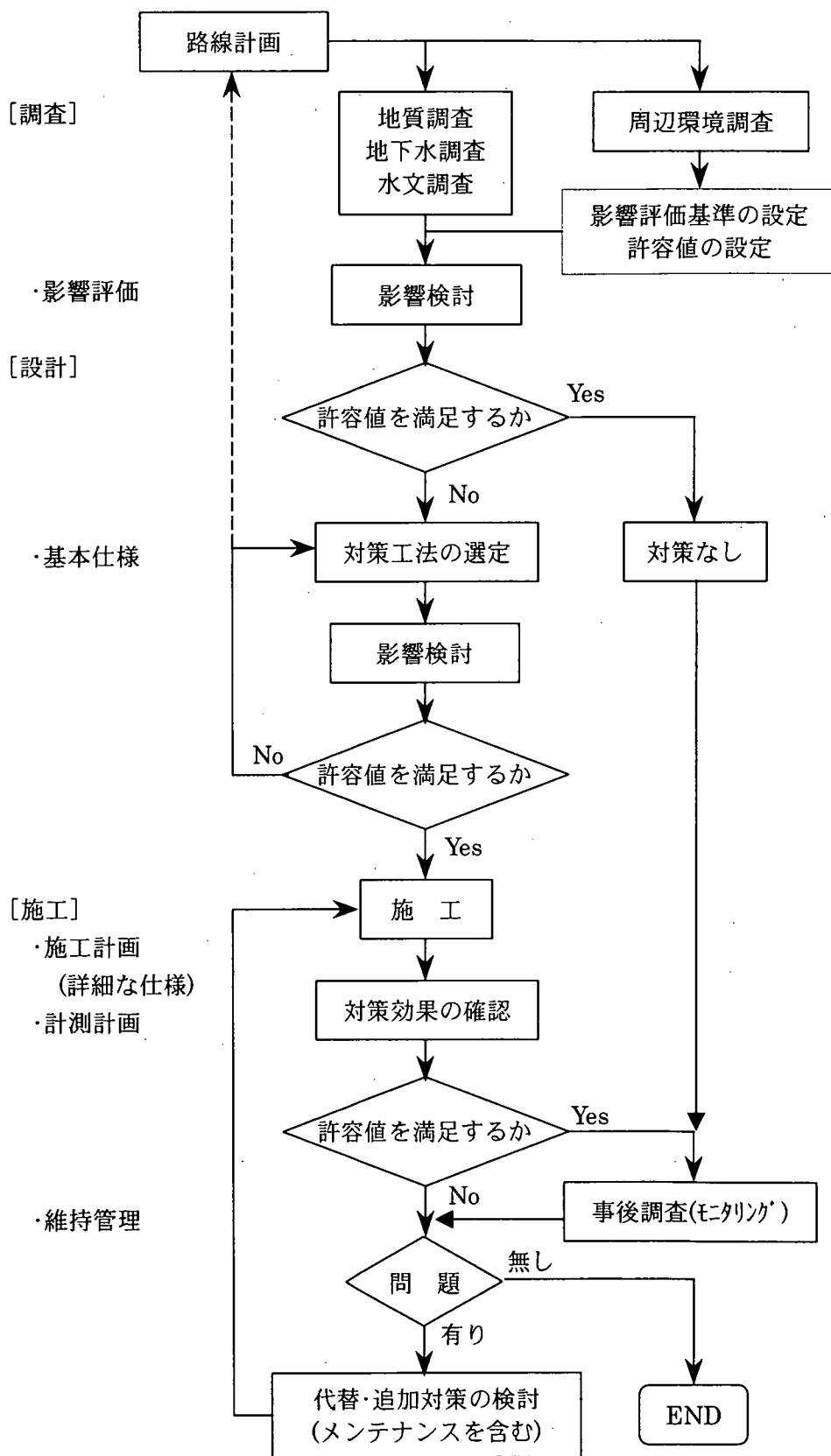


図 1.4.1 地下水流動保全の検討フロー

本マニュアル（試案）の構成は工法検討の手順にしたがって大きく調査、設計、施工・メンテナンスの3項目で構成する。

調査は概要として調査の方針と調査範囲、机上を中心とした事前調査、影響評価と工法検討のための基礎情報を得るための各種現場調査についての本調査の説明をする。

また、影響評価基準を明かにするため周辺環境調査と影響評価の概要についてもこの編で取り上げる。

設計は工法の考え方、設計手順のフロー、工法選定上について述べ、設計手法については評価基準の考え方と設計法について記述する。また、対策工法における土中での流動障害を起こす目詰まり対策についてもこの編で取り上げる。

施工・メンテナンスは地下水流動保全工法の選定と留意点、施工事例の検討、メンテナンスについて述べる。

なお、各項目毎に単独で参考にされる方のため、当該項目に関連する他の項目の内容については一部繰り返し記述している。

2. 調査マニュアル

2.1 調査方針

2.1.1 調査と環境

地中に長大な線状構造物を築造するに際し、それが周辺環境にどのような影響を及ぼすかは事前に把握しておく必要がある。環境基本法（平成5年施行法律第91号）では、道路、ダム、鉄道、飛行場、発電所など規模が大きく、環境に著しい影響を及ぼす恐れがあり、かつ、国が実施し、または許認可などを行う事業に対しては、環境影響評価を行う必要があるとしている。ここでいう事業は、規模に応じて下記のように定められている（環境アセスメントの技術、1999）。

- ・第一種事業：必ず環境影響評価を行わしめる一定規模以上の事業
- ・第二種事業：第一種事業に準ずる規模を有し、環境影響評価を行うかどうかを個別に判定する事業

第二種事業については、当該事業の許認可などを行う行政機関が、知事の意見を聞いて、事業内容、地域特性に応じて環境影響評価を行わしめるかどうかを判定する。環境影響評価を行う必要がある事業に対し事業者は、環境影響評価方法書を作成し、都道府県知事・市町村長・住民などの意見を聞き、評価方法を具体化する。その後、環境影響評価書を作成、補正し、それに準じて環境影響評価を実施する手順となる。

環境影響評価について、

『対策を予定しているから負荷は発生しない』という考えの下に調査・予測・評価を省略するのではなく、「対策を講じるこにより本来発生するはずの負荷が十分に回避・低減されていることを明らかにする」ことが重要である。』

としている。

また、平成9年6月に公布された環境影響評価法では、スコーピング制度を導入していることが特徴である。スコーピング制度とは、「事業者が実際の調査、予測、評価を開始する前に、事業の概要と実施しようとする環境影響評価の内容を公開し、それについて住民、専門家、行政等、外部の意見を聴取することによって、環境影響評価の内容を絞り込む手続き」をいう（環境影響評価法、1999）。

環境影響評価法の対象事業を表2.1.1（環境アセスメントの技術、1999）に、環境影響評価の項目の範囲を表2.1.2（環境影響評価法、1999）に示す。

一方で、環境基本法とは別に、地下水に流動がある地域に線状構造物を築造する場合、周辺地域に及ぼす影響を事前に把握しておく必要がある。調査の範囲は、過去の事例、地形・地質・社会的環境、数値解析結果などをもとに、事業の規模を考慮し、対策工の設計に必要な境界条件が得られるように設定する。

表2.1.1 環境影響評価法の対象事業（環境アセスメントの技術、1999）

事業の種類		第一種事業の規模	第二種事業の規模	
1	道路（大規模林道を新規追加。）	すべて	――	
	高速自動車国道	4車線以上のものすべて	――	
	一般国道	4車線10km以上	7.5km以上10km未満	
	大規模林道	2車線20km以上	15km以上20km未満	
2	河川（二級河川に係るダム、工業用水堰、灌漑用水堰、上水用水堰を追加、規模の引き下げ）			
	ダム	湛水面積100ha以上	75ha以上100ha未満	
	堰			
	湖沼水位調節施設	改良面積100ha以上	75ha以上100ha未満	
放水路				
3	鉄道（普通鉄道、軌道（普通鉄道相当）を新規追加）			
	新幹線鉄道（規格新線を含む）	すべて	――	
	普通鉄道（地下化、高架化を含む）	10km以上	7.5km以上10km未満	
軌道（普通鉄道相当）				
4	飛行場	滑走路長2500m以上	1875m以上2500m未満	
5	発電所（新規追加、自家発電、卸供給）			
	水力発電所	出力3万kW以上	2.25万kW以上3万kW未満	
	火力発電所（地熱以外）	出力15万kW以上	11.25万kW以上15万kW未満	
	火力発電所（地熱）	出力1万kW以上	7500kW以上1万kW未満	
	原子力発電所	すべて	――	
6	廃棄物最終処分場	30ha以上	25ha以上30ha未満	
7	公有水面埋立および干拓	50ha超	40ha以上50ha未満	
8	土地区画整理事業	100ha以上	75ha以上100ha未満	
9	新住宅市街地開発事業			
10	工業団地造成事業			
11	新都市基盤整備事業			
12	流通業務団地造成事業			
13	宅地の造成の事業（工業団地を含む）			
	環境事業団			
	住宅都市整備公団			
	地域振興整備公団			
	港湾計画	埋立・掘込み300ha以上	――	

表2.1.2 環境影響評価項目一覧表（環境影響評価法、1999）

環境要素の区分			影響要因の区分	工事			存在・供用		
			細区分						
環境の自然的構成要素の良好な状態の保持	大気環境	大気質							
		騒音							
		振動							
		悪臭							
		その他							
	水環境	水質							
		底質							
		地下水							
		その他							
	土壌環境・その他の環境	地形・地質							
		地盤							
		土壌							
		その他							
生物の多様性の確保及び自然環境の体系的保全	植物								
	動物								
	生態系								
人と自然との豊かな触れ合い	景観								
	触れ合い活動の場								
環境への負荷	廃棄物等								
	温室効果ガス等								

2.1.2 調査の目的

地下水流動保全工法は、地下水の流れを確保するための工法であり、この計画、設計、管理を行うためには、地下水や地盤の状況および周辺環境の状況を調査する必要がある。

調査の目的は、次の2点である。

- ① 影響評価、対策工の設計、施工計画、竣工後のメンテナンス計画を検討する上で必要なデータを得るために調査を行う。
- ② 現状の地下水の流動状態を把握するとともに、周辺環境と地下水の関係を検討し、対策の必要性を判定し、対策の目標値を設定するために調査を行う。

【解説】

- 調査を行うに当たっては、調査の目的を明確にしておく必要がある。
- 当「マニュアル」では、調査を「事前調査」「本調査」「周辺環境調査」「影響評価」に区分している。
- 「事前調査」は、対象地域の地盤や地下水の状況を把握するとともに、事業実施に伴う地下水流動阻害の影響を概略的に検討し、以後の本調査や周辺環境調査等の詳細調査の必要性を判断するために行うもので、文献や既往の土質調査資料、法的規制等の調査が中心となる。
- 「本調査」は、流動阻害の影響の詳細検討の際の解析モデルや境界条件、外力条件を設定するために必要となるデータを得るために行うものである。
また、地下水の水質の状況や目詰りの防止、進行予測など、対策工法の設計、施工、維持管理を行う上で必要となるデータを得ることも目的としている。
- 「周辺環境調査」は、事業対象箇所周辺の現状の環境を把握するとともに、流動阻害による影響の限界値や許容値など対策工法の設計、施工、維持管理を行う上で目標となる値を設定するために行うものである。
- 「影響評価」は、「事前調査」や「本調査」「周辺環境調査」で得られたデータをもとに、数値解析や簡易計算により事業に伴う地下水流動阻害の影響を定量的に推定するものである。
- 調査は、施設の計画、設計、施工、維持管理の各段階において、それぞれ必要となるものであるが、本章では設計の前段階で行う調査を中心に述べている。(図 2.1.1 参照)
施工および維持管理段階の調査については、4章を参照されたい。

2.1.3 調査の進め方

調査は次の手順で行う。

- ① まず事前調査として既往調査、文献、データベース、法的規制などを調べ、対象地域の地盤と地下水の状況を把握する。
- ② 地盤や地下水の状況や構造物の延長、深度、方向などから流動阻害による影響範囲を推定する。
- ③ ①②で得られた情報をもとに流動阻害の影響を概略的に検討する。
- ④ 概略検討で影響が生じると想定される場合は、詳細調査を行うものとし、影響の程度や地盤沈下、植生など周辺環境の状況を考慮して詳細調査を行う範囲を設定する。
- ⑤ 本調査を行って詳細検討の解析条件等を設定する。
- ⑥ 周辺環境調査を行って流動阻害の許容値等を設定する。
- ⑦ ⑤⑥で得られた情報をもとに詳細検討を行って、流動阻害の影響が許容値を超えるか否か判定する。
- ⑧ 詳細検討で対策が必要と判断される場合は、対策工の設計、施工を行う。
対策工施工中および施工後もモニタリングとして観測を続ける。
また、③や⑦で対策が不要と判定された場合も、一定期間はモニタリングを行う。

図 2.1.1 にフローチャートを示す。

【解説】

- 地下水流動阻害の影響を評価するためには、広範囲にわたって詳細なデータが必要となり、そのためには相応の費用と期間を要することから、概略的な調査や簡易計算によって以降の調査の必要性を判断しながら、段階的に精度を上げていくような方法が望ましい。
 - このため、まず「2.3 事前調査」に示す机上調査で得られた情報をもとに、「2.6 影響評価」に示す簡易計算などにより流動阻害の影響を概略的に検討する。検討において資料が不足している場合は、簡易調査を行って補足する。簡易調査の方法は、以後の本調査および周辺環境調査に準じる。
 - 概略検討の段階では、十分な情報が得られていない場合が多いので、影響がないことが明らかな場合以外は、以降の詳細調査を行うのが望ましい。
 - 詳細調査が必要と判断される場合は、「2.4 本調査」や「2.5 周辺環境調査」に示す詳細調査を行ってデータの精度を上げ、再度「2.6 影響評価」に基づいて詳細検討を行う。
 - 当工法は、まだ施工実績がそれほど多くなく、調査、設計、施工、維持管理の手法が十分確立されたものではない。また、一般に工事と地下水との関連については、想定外のことが発生することが少なくない。このため、施工中や施工後もモニタリングとして観測を継続すべきである。
- 同様に、影響は生じないと想定し本調査などを行わない場合も、周辺地下水の状況などを観測すべきである。

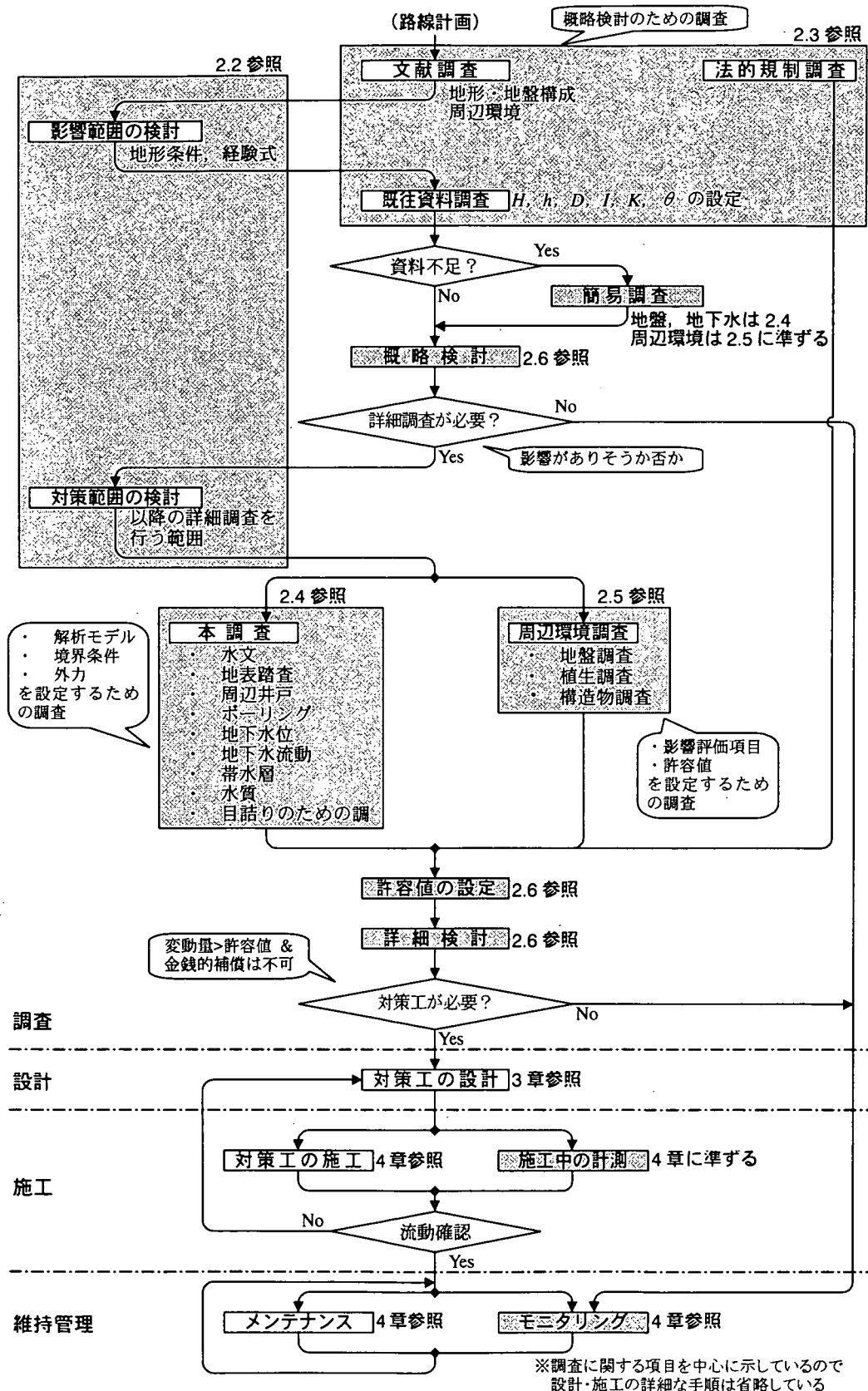


図 2.1.1 調査の進め方 (着色部が「調査」の項目)

2.2 調査範囲

2.2.1 調査範囲の考え方

○ 調査範囲はその目的によって下記の様に2つに分けられる。

- ①対策を行わない場合に影響が及ぶ範囲（影響範囲）
- ②対策工を設計・施工するための範囲（対策範囲）

【解説】

- 調査範囲は、対策を行わない場合に影響が及ぶ影響範囲と、実際に対策工を設計・施工する対策範囲に分けられる。
- 影響範囲と対策範囲とは調査する範囲（面積）が異なり、後者に比べて前者の方が広域的である。
- この段階では、影響調査の範囲を決定することに主眼をおき、事前調査の基礎資料とする。
- 理想的には、水収支を考える範囲を想定し、涵養源から流出地点まで調べるのが望ましい。

2.2.2 調査範囲の目安

- 調査範囲は、過去の事例や数値解析の結果を基本に、それに周辺の地形・地質・社会的環境を考慮し、総合的な見地から決定する。

【解説】

- ・ 調査範囲は過去の事例もしくは数値解析の結果をもとに、周辺の地形・地質・社会的環境を考慮し、最終的な調査範囲を決定する。
- ・ 周辺環境を考慮するには、新旧地形図、土地条件図、土地分類図、空中写真、地質図などが参考になる。
- ・ 具体的には、図2.2.1に示すように、地形の変化、分水嶺や河川の存在、地質の違い、線状地下構造物の存在、地下水利用状況などが調査範囲を決める指標となる。
- ・ ただし、対象となる地下水が不圧地下水と被圧地下水では指標が異なる。

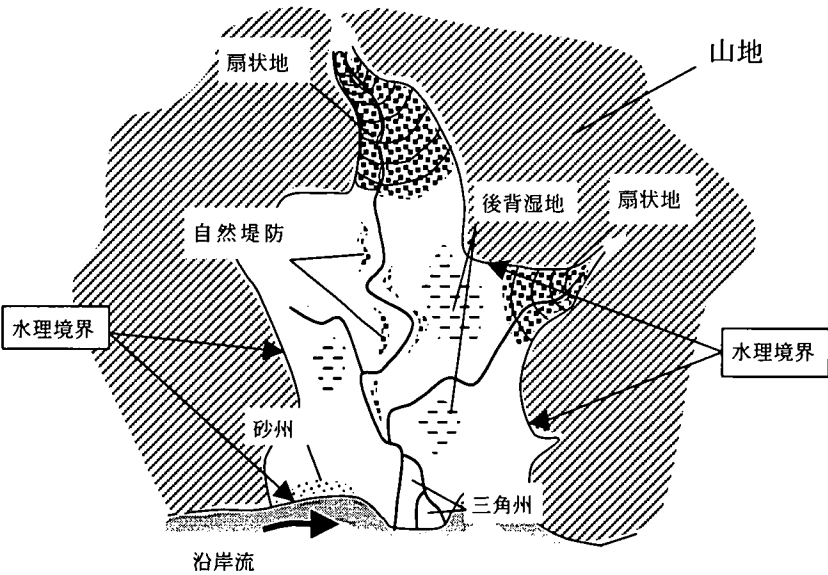


図2.2.1 沖積低地における調査範囲の例

- ・ 既存の地下水流動保全工法の工事の事例は下表の通りである。

表2.2.2 施工事例（東京都建設局、1997）

施工事例	調査範囲
東京環状8号線	路線中心から幅 500m
京都市地下鉄	路線中心から幅 上流側200m、下流側500m
阪神電鉄西宮	路線中心から幅 上流側200m、下流側500m
阪和道堺（試験施工の計測）	涵養井から80m

- ・ 調査範囲の考え方と調査事例を機関別にまとめ、表2.2.3、表2.2.4に示す。
- ・ 東京都建設局(1997)における地層別地下水調査区域を、表2.2.5、図2.2.2に示す。

表 2.2.3 機関別地下水調査範囲

機 関	出 典	構 造 物	構 造 形 式	調 査 範 囲 の 考 え 方	具 体 的 内 容	発 行 年 月
日本道路公団	土質地質調査要領	道路	トンネル全般	地形、地質的単元で決定する。基本的には個々に異なる。断層がある場合は、走向方向に拡大する。	トンネルを挟んで、両側に土被りの2～4倍程度	平成4年4月
	"	道路	土工(切土、盛土)	扇状地、丘陵地形、盛土は要注意である。利用水源を考慮して決定する。		平成4年4月
	設計要領第三集 トンネル	道路	山岳トンネル 2車線自動車トンネル	水文環境調査は計画段階・調査設計段階・施工段階で必要に応じて実施する。環境保全の観点から調査範囲を決定する。		平成9年10月
	地質調査標準指示方書 トンネル	鉄道	トンネル全般	水文調査、水文地質調査、水文環境調査からなる。水利用等への影響を予測できる範囲とする。		平成3年9月
土木学会	トンネル標準指示方書	道路、鉄道、水路等	山岳トンネル	①既往施工事例の検討 ②地形・水文地質条件 ③水理公式 ④数値解析 により決定する。水文調査は段階的に実施		平成8年7月
	"	"	シールドトンネル	密閉型の場合は限定される。季節変動を考慮して決定する。		平成8年7月
	"	"	開削トンネル	帯水層別に分布(水位変動)と流動性(透水系数、貯留係数)を把握する。調査範囲は影響が予想される範囲とする。		平成8年7月
	トンネルの地質調査と 岩盤計測	道路、鉄道、水路等	トンネル全般	水文地質調査、水文地質調査、水文環境調査、事例調査の4項目から構成される。調査範囲については特に記載なし。		平成58年7月
日本道路協会	共同構造設計指針	道路	シールド、推進、開削 山岳トンネル	特に記載なし。周辺環境に及ぼす影響を調べる。		昭和61年3月
	トンネル湧水調査法に 関する調査研究(Ⅱ)	道路、鉄道、水路等	山岳トンネル	トンネル湧水の流出範囲は、①水文学的方法 ②水理学的方法 ③地質学的方法 がある。地下水文調査の範囲はこれを参考にする。		昭和55年2月
	トンネル施工に伴う湧水 調査に関する調査研究 (その2)	道路、鉄道、水路等	山岳トンネル	トンネル施工に伴う水位低下範囲は、一般的に左右対称に現れるが、地下水流がある時、上流側に狭く、下流側に広く現れる。調査範囲は行政界で決めるのではなく地形・地質条件、延長、土被り、水理境界等を考慮して決定する。	一般的な地質、土被り条件で片側200～500m程度 断層 破砕帯では1～2kmに及ぶ例もある。	昭和58年2月
東京都	工事に伴う環境調査要領	道路、河川、その他の 掘削工事、トンネル	開削工事、トンネル工 仮設工	対象地層別に概査と精査に区別する。	開削工：概査200～300m以内、精査100～150m以内 砂層層：概査300～500m以内、精査150～300m以内	昭和47年 その後4回改訂

表 2.2.4 調査事例

機 関	構 造 物	構 造 形 式	調 査 範 囲 の 考 え 方	具 体 的 内 容	備 考
東京都	道路(環状8号)	開削トンネル	地形区分と地下水位観測結果をもとに設定	片側500m	観測孔の設置範囲 調査間隔は50～300m
京都市	地下鉄	開削	地下水流動方向の下流側で大き目に設定	上流側200m、下流側500m	同上 調査間隔は100～300m
阪神電鉄	立体交差	地下掘削	同上 宮水保存	上流側200m、下流側500m	同上 調査間隔は50～200m
阪和道	堀割道路	開削		涵養井から80m	同上 調査間隔は30、50、80m
建設省(九州)	共同溝	開削トンネル(市街地)	揚水試験により影響半径を確認して設定	片側300m	水位、水質(12項目)、揚水量を計測
建設省(中部)	"	"	地下水位と影響半径Rを考慮	片側500m	
日本道路公団	道路	山岳トンネル	土被りの2倍程度、分水界を考慮	片側400m	
"	"	"	山間部の狭谷部、井戸は2ヶ所のみ	片側200m	
県土木事務所	"	土工(切土法面)	影響半径Rを参考に決定 地形も参考(山地で水理境界)	片側500m	
"	"	山岳トンネル	高橋の方法、土被りの4倍程度	片側200m	
"	"	"		片側160m	
"	"	橋梁			
"	"	土工(切盛)及びトンネル	水文地質を考慮	北側500m、南側1km	南側には酒造会社があるため、調査範囲を拡大

表2.2.5 地層別地下水調査区域

地層	精査区域	概査区域
関東ローム相当層	100～150m以内	200～300m以内
砂礫層相当層	150～300m以内	300～500m以内

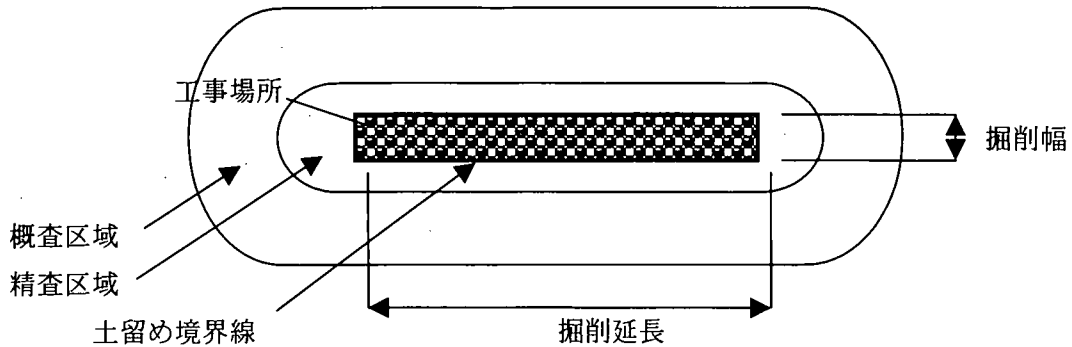


図2.2.2 調査区域の取り方（東京都建設局、1997 に加筆）

- 一般的には200～500m程度の事例が多く、断層破碎帯では1～2 kmに及ぶ。
- 影響半径Rを推定する際、比較的よく知られている公式としては下記のものがある。
 - 半経験式
 - レンケ式 Lembke (1886,1887) $R = H(k/2N)^{1/2}$
 - ベーバー式 Weber (1924) $R = 2.45(HkT/ne)^{1/2}$
 - クサキン式 Kusakin (1953) $R = 1.9(HkT/ne)^{1/2}$
 - 経験式
 - ジーハルト式 Siechardt (1962) $R = 3000Sw(k)^{1/2}$
 - クサキン式 Kusakin (1949) $R = 575Sw(Hk)^{1/2}$
- ここで、Rは影響半径、Hは飽和帯水層の最初の厚さ、kは透水係数、Nは降雨による増加量、Tは時間、neは比湧出率(あるいは有効間隙率)、Swは揚水井における水位低下量である(山本、1983)。
- 数値解析による簡易の予測法には、進士(1999)や高坂(1999)の提案法がある。
 - 【簡易計算(1)(進士 1999)、後述2.6.4(2)]
 - 地盤が均質で、構造物が流動方向と直交し、主帯水層を完全に遮断する場合、自然地下水位からの水位上昇率を、地下水コンターで表現して整理。
 - 水位上昇率の基準は遮水壁の中央部で、Rは影響範囲、Lは構造物の延長を表す。
 - 図2.2.2に示すように、影響圏が中央部で膨らむ形状を採ることが特徴的。
 - 【簡易計算(2)(高坂 1999)、後述2.6.4(3)]
 - 地盤が均質で、構造物が流動方向に対してθの角度で交わる場合、構造物建設に伴う水位変動量Scを数式で算出。

- ・ 水位変動量の基準は遮水壁の中央部で、 I は動水勾配、 L は構造物の半長を表す。
- ・ $S_c = I L \sin \theta$ ($\theta = 90^\circ$ のとき、地下水流動方向と構造物とが直交) …… (1)
- ・ 地表面勾配については下記のものが参考になる。
 - ・ 不圧地下水では、地表面勾配 \equiv 動水勾配と見なし、地形図（例えば $S = 1/25,000$ ）を利用して動水勾配を求めることができる。
 - ・ 建設省（1993）の土地分類図の傾斜区分では、台地・低地の地形面の表面傾斜を、例えば下記のように区分している。

1/10,000未満、 1/3,000未満、 1/1,000未満、
1/300未満、 1/100未満、 1/30未満、 1/10未満
 - ・ 同様に、段丘崖、丘陵、火山地、山地では、下記のように区分している。

3度、8度、15度、20度、30度、30度以上
 - ・ 貝塚他(1988)によると、沖積平野については、堆積環境や堆積作用の違いによって扇状地、自然堤防地帯、三角州に分けられ、その勾配は各々下記のようなのである。

扇状地： $10^{-1} \sim 10^{-3}$ 、自然堤防地帯： $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 、三角州： $< 10^{-4}$
- ・ 不圧地下水の場合、図2.2.3に示すように、上昇した地下水位をレベルと仮定し、現況地下水位と交わる地点までを影響範囲とする考え方もある。

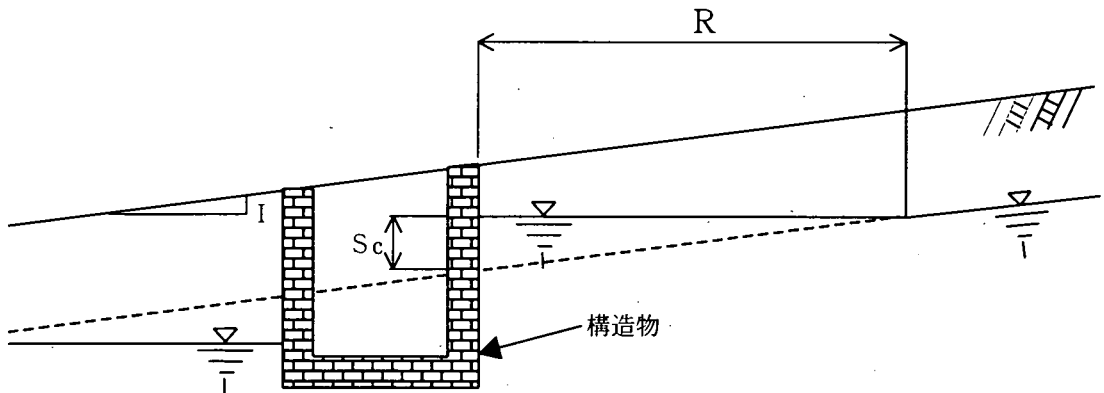


図2.2.3 影響範囲のひとつの考え方（不圧地下水の場合）

- ・ この場合、影響範囲(R)は、地表面勾配 \equiv 動水勾配(I)、上昇した地下水位 $=$ 水位変動量(S_c)としたとき、 $R = S_c / I$ で求めることができる。
- ・ 一方、高坂の式で地下水流動方向と構造物とが直交($\theta = 90^\circ$)するとき、(1)式は、 $L = S_c / I$ となる。
- ・ 両式より、影響範囲(R)は構造物の半長(L)と一致する。この時、影響範囲の形状は、2.6.4(3)の $L/R = 0.5$ の場合で推察できる。

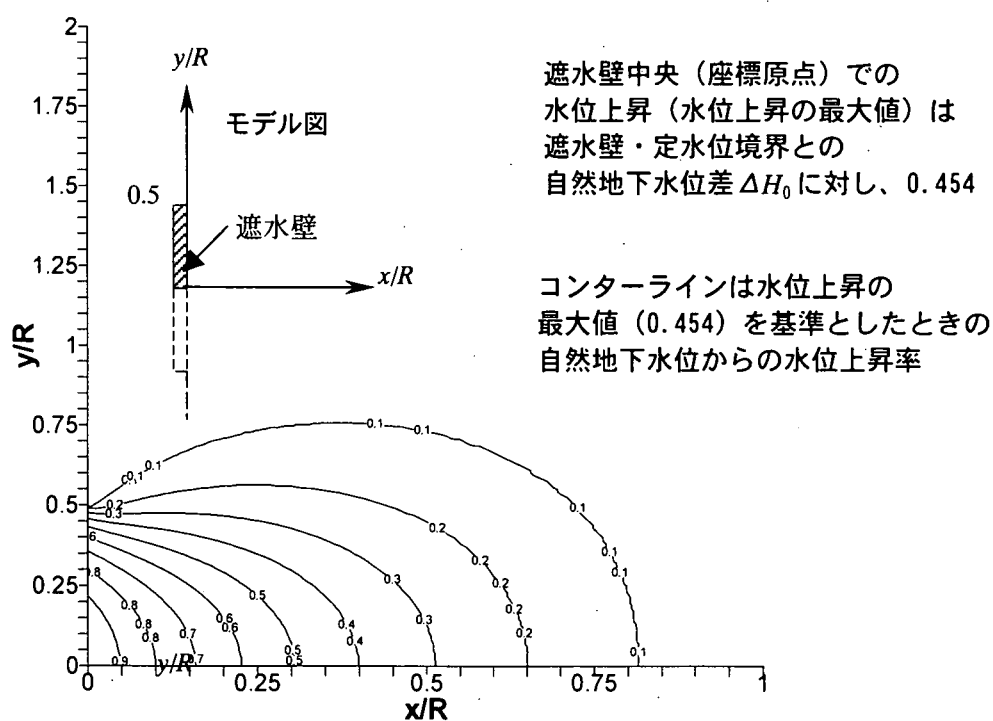
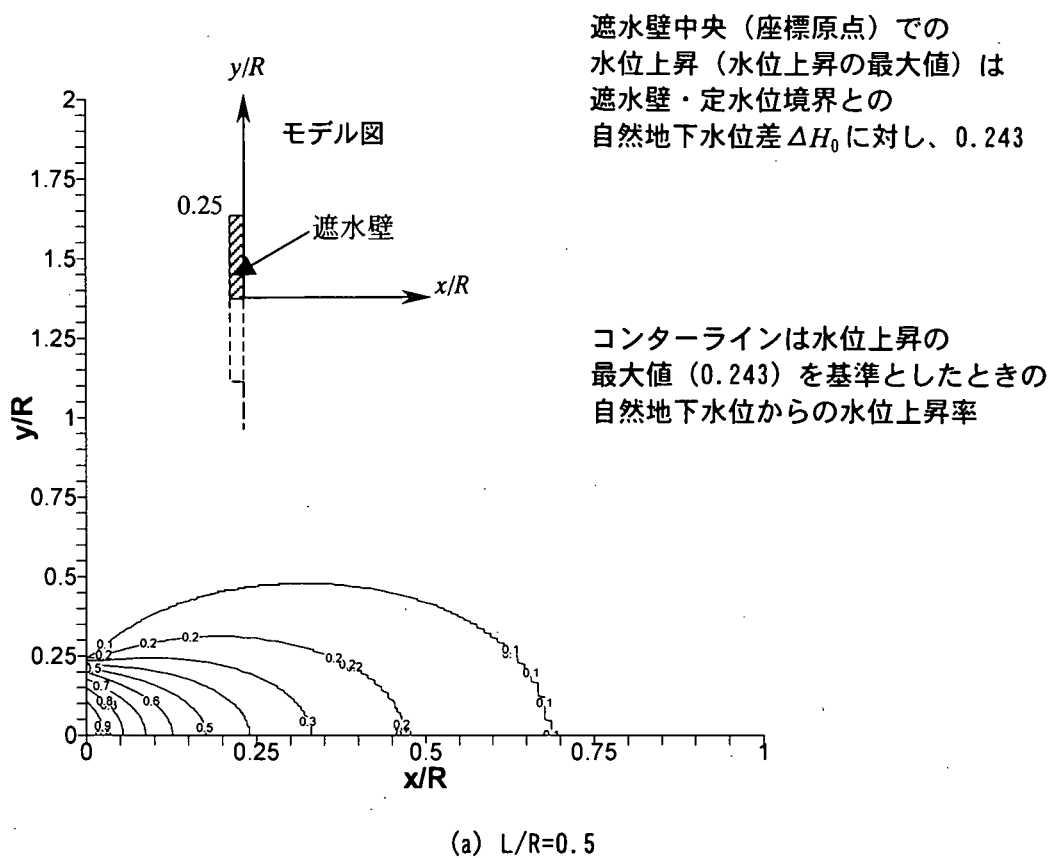


図 2.2.2 虚井戸・群井戸理論による簡易予測計算結果の一例

2.3 事前調査

事前調査は、点的な詳細調査を行う前に、広域的な地盤や地下水の概要、地下水の利用状況を把握し、今後の調査、設計、施工、維持管理の基礎資料とするものである。

また、事前調査で得られた情報をもとに、工事の影響を概略的に予測して詳細調査の必要性を判定するとともに、詳細調査をどの地点で、どの程度行うかを検討し、調査範囲や調査項目を設定する。

2.3.1 文献調査

2.3.1.1 文献調査の意義

文献調査は、既存の調査資料や文献、データベースなどの収集、整理を行って、巨視的な観点から対象地域の地形・地質、土質、地下水、環境などの状況を把握する。

また、広域的な地質構成や長期的(歴史的)な成層状況など、文献調査でしか得られない情報を収集し、今後の調査、設計、施工、維持管理の基礎資料とする。

【解説】

- 調査を始めるに当たり、資料の収集整理を行って、対象地域の問題点を大局的、総合的に把握しておくことは重要である。
- 広域的な地盤や地下水の情報の把握という点に関しては、一般的な文献調査の手法と同様に行えばよい。
- 当工法において留意すべき点としては、「地下水の流動方向や水みちを如何に把握するか」という点である。
- 地下水は、その器である地層状態に沿って流れるため、広域的な透水層や難透水層の分布を把握しておく必要がある。
- 「水みち」は旧河川跡や局所的な低地に沿ったものとなっていることが多い。
このため、古地形や微地形を調べるのが有効である。
古地形については古地図や陸測図が、微地形は地理情報(GIS)などが役に立つ。
- 地下水流動阻害による影響は広い範囲で生じるので、対象地域の周辺で同様の問題が生じている場合は、その現場でも問題が発生する可能性が高い。
従って、延長の長い堀割道路や地下構造物の計画に当たっては、事前調査で周辺の施工事例を調べておくべきである。
- 東京や大阪、神戸、京都などでは、既に帯水層の分布や地下水の流動方向が解明されているため、構造物の深度や方向が判れば、影響の有無が大略的に想定できる。

2.3.1.2 資料の種別と利用目的

(イ) 地形・地質の把握、微地形の把握

① 地形図

地形図は、基図としてそのまま利用することができる他、地表の形態、成立ち、性質などから地形を分類することにより、広域的な地形の把握に用いることができる。

一般に利用可能な地形図の種類と入手方法は表 2.3.1 のとおりである。

表 2.3.1 主な地形図

名称	発行・保有機関	縮尺	情報内容	閲覧・入手方法
国土基本図	建設省国土地理院	1/2 500 1/5 000	全国統一規模による高精度大縮尺図。前者は等高線間隔 2m、後者は 5m。	財団法人日本地図センター
骨格図	同 上	1/2 500	大都市について細部基準点と道路、鉄道、水路などを表示。	同 上
写真図	同 上	1/5 000	空中写真に地名、主要施設名、等高線(5m 間隔)を記入	同 上
湖沼図	同 上	1/10 000	主要湖沼の湖底地形を等高線(5m 間隔)表示	同 上
数値地図	同 上	1/25 000	海岸線および行政界線ベクトルデータ	同 上
	同 上	1/10 000	1/10 000 地形図の主項目のベクトルデータ。首都圏、近畿圏等が中心	
	同 上	50m メッシュ	50m メッシュの標高データ。1/25 000 地形図相当	
地形図	同 上	1/10 000	主要都市について地形地物を詳細に表示。等高線 2m 間隔。	全国の大規模な書店内
		1/25 000	統一した内容・精度で全国をカバーしている最も詳細な地図。等高線間隔は 10m。	
		1/50 000	等高線間隔は 20m。	
地勢図	同 上	1/200 000	立体感あり。等高線間隔は 100m。	

② 空中写真

空中写真は、地形図よりも微細な地形がよく表現され、地形の全体像や広がり、連続性を把握しやすい。また植生、土地利用などの情報も同時に読み取ることができる。

一般に利用可能な空中写真の種類と入手方法は表 2.3.2 のとおりである。

表 2.3.2 主な空中写真

名称	発行・保有機関	縮尺	情報内容	閲覧・入手方法
カラー空中写真	建設省国土地理院	1/8 000～ 1/15 000	カラーなので土地利用、植生がよくわかる。昭和 49～53 年度に撮影。一部地域は昭和 54 年度から再撮影	財団法人日本地図センター
モノクロ空中写真		1/40 000	昭和 21～23 年(米軍撮影)と昭和 39～53 年に国土全域に渡って撮影したもの。	
		1/20 000 1/10 000	昭和 35 年度以降に全国の平野部を対象に 5～10 年周期で反復撮影されている。	
	林野庁指導部 計画課	1/20 000 1/16 000	林野庁および都道府県林務課が山地部を対象に昭和 27 年以降撮影。5～10 年ごとに反復撮影	財団法人日本林業技術協会航測部空中写真室

③ 地質図

地質図は、岩種、生成時代、地層の重なり具合、破碎状況などを図示したものであるが、土木工学的な目的で作成されたものには、湧水位置や地下水水質などが示されているものもあり、水理基盤の深さ、帯水層の分布、地下水流域の推定などに利用できる。

一般に利用可能な地質図の種類と入手方法は表 2.3.2 のとおりである。

表 2.3.3 主な地質図

名称	発行・保有機関	縮尺	情報内容	閲覧・入手方法	備考
地質図	工業技術院地質調査所	1/500 000 1/2 000 000 1/75 000 1/50 000	1/200 000 と 1/50 000 のものは整備が進んでいる。1/50 000 のものは現地調査(約 3 年間)の結果に基づき調製されている。	社団法人東京地学協会地学文献センター	全国はカバーしていないものもある
水理地質図	同 上	1/100 000 1/50 000 1/25 000	地下水の取得可能量から地質区分が表示されている。地下水水質や柱状図も表示されている。	社団法人東京地学協会地学文献センター	
日本地質図(日本地質アトラス)	同 上	1/1 000 000	日本の地質分布状況が詳細かつ包括的に捉えられる地質図である。		
地質図	都道府県	1/200 000	県単位毎にとりまとめられた地質図である。	内外地図(株)	
土木地質図	(財)国土開発技術センター	1/200 000	地方単位毎にまとめられた土木地質図で、九州、中国、近畿、北陸、東北、中部の各地方が完成。内容は、土木地質図とその解説書からなり、各地方の土木地質からみた地質特性が表現されている。	財団法人国土開発技術センター	

(D) 地層構成，帯水層の分布，地下水位分布

① 地盤図

地盤図は、大都市の主として第四紀層を対象に既存のボーリングデータを多数収録し図示したもので、ボーリング位置、地盤区分、地層や基盤の状況などが示されている。これにより、帯水層の種類や分布状況などが読みとれる。

地盤図は各種機関より種々発行されており、代表的なものを示すと表 2.3.4 のとおりである。

表 2.3.4 主な地盤図

地域	書 名	発行年	編集制作者	発行所
関東	都市地盤調査報告書第 6・17・20 巻〔茨城県鹿島地区、東京湾周辺地帯、茨城県水戸・日立地区〕	'64,'69,'69	建設省、茨城県・東京湾総合開発協議会	大蔵省印刷局
	神奈川県地盤図	'72	神奈川県建築士会	同左
	東京都地盤地質図(三多摩地区)	'76	東京都	東京都防災会議地震部会
	東京都総合地盤図(Ⅰ)－東京低地部－	'77	東京都土木技術研究所	技報道
	筑波研究学園都市地盤図	'80	建設省筑波研究学園都市営繕建設本部	(財)建築保全センター
	川崎市環境地質図調査報告書	'81	川崎市公害局水質課	同左
	川崎市地質図集, Ⅱ,Ⅲ	65'72,'83	川崎市計画局	同左
	横浜市軟弱地盤層調査報告書(3冊分)	'88	横浜市公害研究所	同左
	東京都総合地盤図(Ⅱ)－山の手・北多摩地区－	'90	東京都土木技術研究所	同左
	東京都(区部)大深度地下地盤図	'96	東京都土木技術研究所	同左
中部	都市地盤調査報告書第 1・2・4・9・11 巻〔伊勢湾北部臨海地帯、伊勢湾南部臨海地帯、愛知県三河地区、愛知県衣浦地区、愛知県一宮地区〕	'62,'62,'63,'65,'65	建設省、愛知県・三重県・一宮市	大蔵省印刷局
	長野市地盤図	'73	長野県建築士会	カシヨ印刷
	濃尾平野の地盤資料	'78	建設省中部地方建設局中部技術事務所	同左
	静岡県地震対策基礎調査報告書	'83	静岡県地震対策課	同左
	最新 名古屋地盤図	'88	土質工学会中部支部名古屋地盤図委員会	名古屋地盤図出版会
関西	神戸の地盤	'80	神戸市企画局	同左
	京都市内ボーリングデータ集	'86	建築行政協会京都支部	大龍堂書店
	新編 大阪地盤図	'87	土質工学会関西支部、関西地質調査業協会	コロナ社
地域	書 名	発行年	編集制作者	発行所
中国	都市地盤調査報告書第 5・13・15 巻〔広島地区、山口県周南地区、中海臨海地帯〕	'64,'66,'67	建設省、広島県・広島市・山口県・鳥取県・島根県	大蔵省印刷局
	大竹・岩国地区地盤図	'70	日本建築学会中国支部基礎地盤委員会	日本建築学会中国支部
	呉地区地盤図	'71	日本建築学会中国支部基礎地盤委員会	日本建築学会中国支部
	鳥取県地盤図	'81	日本建築学会中国支部・鳥取県建築士会	同左
	岡山県臨海地帯地盤図	'84	米子工業高等専門学校地域防災研究班	同左
	広島県東部地盤図	'86	日本建築学会中国支部	同左
	広島県西部地盤図	'87	日本建築学会中国支部	同左
	都市地盤調査報告書第 7・8 巻〔徳島県臨海地帯、愛媛県東予地区〕	'64,'65	建設省、徳島県・愛媛県	大蔵省印刷局
九州	都市地盤調査報告書第 14・18・19 巻〔宮崎県日向・延岡地区、北九州地区、鹿児島・姶良地区〕	'67,'68,'69	建設省、宮崎県・北九州市・鹿児島県	大蔵省印刷局
	飯塚市地盤図	'71	飯塚市地盤図作成委員会	同左
	熊本地盤図	'71	日本建築学会九州支部	同左
	大分地区地盤図	'72	九州建設施工管理協会	同左
	宮崎市地盤図	'79	宮崎市	同左
	福岡市地盤図(増補版)	'81	福岡県建築士会	同左
	福岡地盤図	'81	九州地質調査業協会	同左
	福岡地盤図(南部編)	'92	福岡県地質調査業協会	同左

② 既往土質調査資料、地盤情報データベース

既往土質調査や地盤情報データベースは、帯水層や地下水位に関して詳細な情報を得ることができるが、非公開のものが多く、また一般の文献資料等は比較的汎用的な利用を意図して作成されているのに対し、これらの情報は特定の目的のために作成されたものが多く、データに安全側あるいは危険側の評価を加えている場合があるので、利用に当たってはこの点に留意する必要がある。

表 2.3.5 主な地盤情報データベース

開発機関	開発目的	データベースの内容										備考 (その他主な情報)
		地図情報	件別情報	孔別情報	土質柱状図	物理試験	力学試験	N値	孔内載荷	現場透水	PS検層	
運輸省港湾技術研究所	設計、港湾計画立案		○	○	○	○	○	○				特殊試験の有無
建設省(JACIC)	建設事業の効率的な実施		○	○	○	○	○	○				
国立防災科学技術センター	都市防災、防災情報処理などの研究		○	○	○	○	○	○	○	○	○	
日本道路公団	軟弱地盤上の盛土施工管理、データの有効利用		○	○	○	○	○	○	○			動態観測データ等
東京都土木技術研究所	地盤上法の管理、提供、調査研究	○	○	○	○	○	○	○				
土質工学会関西支部、 関西地質調査業協会	大阪地盤図の作成		○	○	○	○	○	○				
土質工学会中部支部	名古屋地盤図の作成	○	○	○	○	○	○	○	○		○	常時微動、地震動
大阪市立大学	地質構造の解明		○	○	○			○				GEODAS
熊本大学	データ集中管理、地質構造解明		○	○	○	○	○	○				各種現位置試験の有無
佐賀大学	地盤成立過程の研究、地盤有効利用計画策定			○	○			○				
豊橋技術科学大学	地盤特性検討		○	○	○			○				
(社)全国地質調査業協会連合会	試験システム	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	

(ハ) 地下水利用状況

地下水の利用状況に関する資料として井戸台帳等があるが、ここから得られる情報は深井戸に関するものが多く、工事による影響の大きい浅井戸に関しては「2.4.3 周辺井戸調査」に示すアンケート調査などを行う必要がある。

表 2.3.6 地下水利用状況に関する主な資料

資料名	内 容	編集者または発行所
全国深井戸調査および全国深井戸分布図	都道府県別、全国地下水(深井戸)資料台帳の要約	国土庁土地局
農業用地下水採取施設台帳	主要農業地帯、閲覧可	農林水産省 地方農政局
工業用水源地域調査	主要平野別、地質調査所月報	地質調査所
工業用地下水採取施設台帳	工業統計として市販、全国カバー	都道府県工業統計局
上水用地下水採取施設台帳	保有期間で閲覧可	上水道管理部局
東京港地盤沈下観測調査報告書	東京湾埋立地 6 ヶ所、1970 年頃から現在、地下水位と地盤沈下量	東京都港湾局
水準測量・地盤沈下・地下水位観測成果	都道府県別、水準点標高と地下水位の経年変動	環境庁、都道府県
日本の地下水	農業用地下水研究グループ「日本の地下水」編集委員会	(株)地球社
濃尾平野の地盤沈下と地下水	東海三県地盤沈下調査会編	名古屋大学出版会

(ニ) 旧河川跡などの水みちの存在

地下水は一般的には帯水層の分布形状に従って流動するが、旧河川跡などの「水みち」が存在する場合、局所的に流動方向が異なる場合がある。

また、対策工の施工を行う場合、水みちを狙って集排水施設を配置するのが効果的である。

このように当工法では、水みちの存在を突き止めることが工事の成否を左右することがあるため、資料調査や地形判読によってできる限り情報を収集整理し、「2.4.2 地表踏査」に示す現地踏査を行ってこれを確認することが重要である。

表 2.3.7 旧河川跡などに関する主な資料

資料名	内 容	編集者または発行所
日本図誌大系	地方別(全 12 巻)1/50,000 中心、明治(陸地測量部)～現代(国土地理院)	朝倉書店
空中写真	米軍が昭和 21 年(1946)から 23 年に主要平野部、鉄道沿線を撮影したもの。	(財)日本地図センター
明治・大正・昭和東京 1 万分 1 地形図集成	解題：清水靖夫、地名校閲：本田豊(1983.11)	柏書房
地図でみる県の移り変わり(全 4 冊)	明治 25 年頃、昭和 12 年頃、昭和 35 年頃	(株)昭和礼文社
水害地形分類図	旧河川跡など、一級河川を中心、大屋雅彦編	建設省の工事事務所
古地図、絵図	各種	国土地理院で閲覧

2.3.1.3 資料の整理方法

収集した資料は次のような整理を行う。

- ① 地形、地質を把握し、地下水流動モデルを想定する。
- ② 既往ボーリング調査の孔内水位をもとに、コンター図を描き、流動方向を把握する。

【解説】

- 地形、地質状況をもとに地盤の堆積環境を踏まえ、次のような事項を考察して地下水流動モデルを想定する。
地盤のモデル 帯水層の深度、流下経路、不透水層の連続性、水みちの存在
境界条件..... 涵養源・流出地点の位置、境界の水位・流量条件
- 既往ボーリング調査の孔内水位をプロットし、等高線を描くことにより地下水の流動方向が想定できる。
ただし、地下水位は天候や潮位、河川水位などの自然条件や、井戸からの揚水や田畑の灌漑など人為的な要因によって変動するため、等高線を描く際にはこの点に配慮する必要がある。
- この他、本調査で得られた値と対比し照査するため、既存資料から得られた帯水層の構成、地下水位、透水係数等の諸定数を整理しておく。

2.3.2 法的規制調査

工事に伴う周辺への影響や対策工の検討を行うに当たり、地下水の量と質に関する地域の規制を調べておく。

【解説】

- 「量」に関する規制として、次のようなものがある。

種 別	内 容
法律による規制	<ul style="list-style-type: none">工業用水法…工業用水の過剰汲み上げによる地盤沈下等を防止するもの建築物用地下水の採取に関する法律(ビル用水法)…建築物用地下水の汲み上げによる地盤沈下等を防止するもの
条例による規制	<ul style="list-style-type: none">地下水および地盤沈下に関する条例などの制定状況は図 2.3.1 のとおり。(地下水要覧, 1988, p.49)条例の目的は、地盤沈下の防止、地下水の保全、環境保全の三つに大別されるが、地盤沈下防止を目的とするものが多い。規制対象用途として、工業用水法、ビル用水法が特定の用途を対象としているのに対し、条例ではほとんどの用途に及んでいる。横浜市は、地盤沈下をもたらすものとして地下掘削工事を規制している。(地下水ハンドブック, 1998, p.1479)
協議会等による自主規制	<ul style="list-style-type: none">平成 7 年度までに全国の 34 地域で地下水利用対策協議会が設立されており、地下水の適正利用計画の策定、地下水利用状況の監視等の自主規制を実施している。(地下水ハンドブック, 1998, p.627)

- 「質」に関する規制として、次のようなものがある。

種 別	内 容
法律による規制	<ul style="list-style-type: none">水質汚濁防止法…地下水への浸透禁止措置がとられている有害物質として、平成元年度にトリクロロエチレン、テトラクロロエチレン、平成 5 年度にジクロロメタン等 13 物質が加えられている。

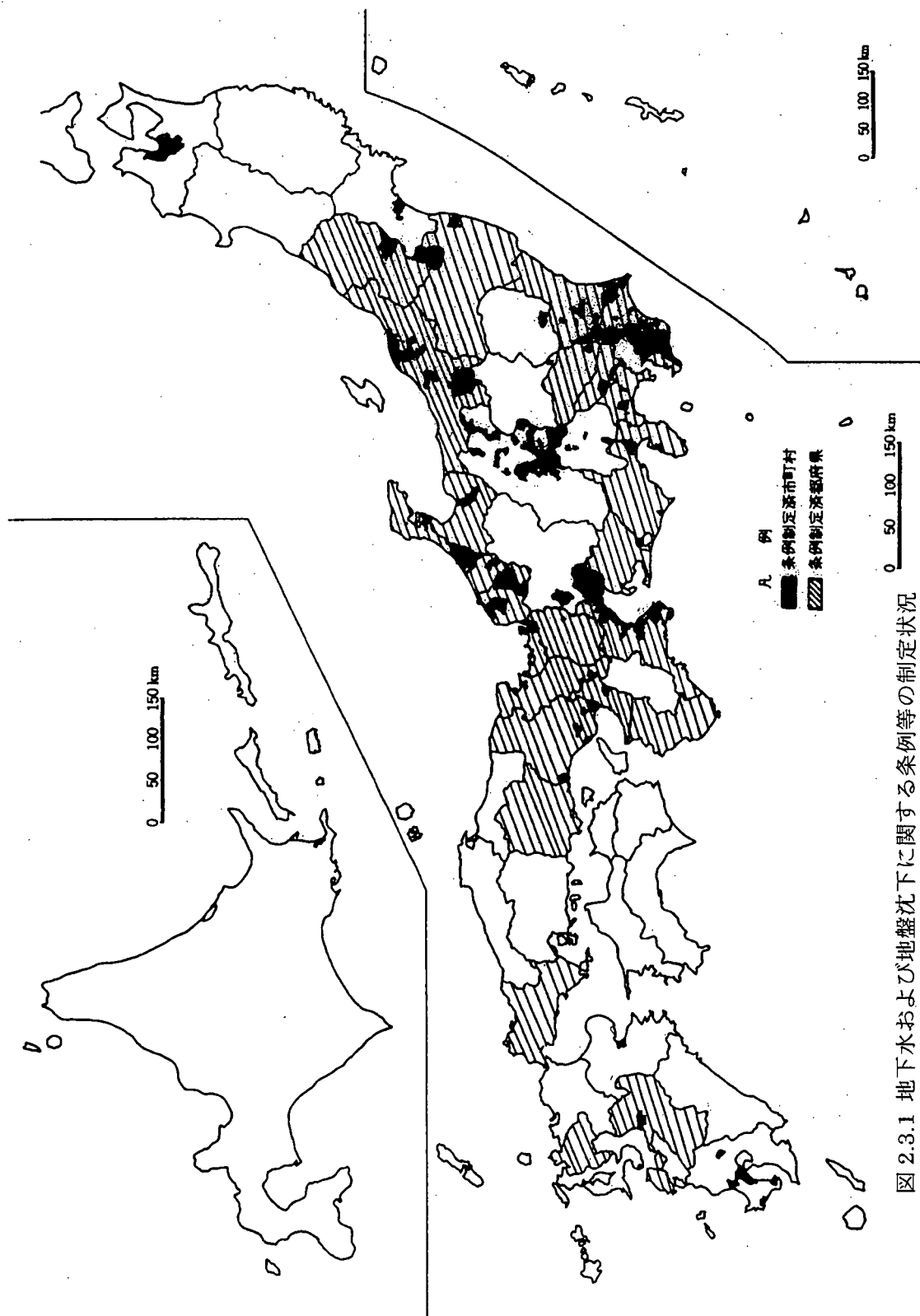


図 2.3.1 地下水および地盤沈下に関する条例等の制定状況
(地下水要覧, 1988, p.49 より)

2.3.3 詳細調査の計画

2.3.3.1 詳細調査の必要性

詳細調査を行う前に、事前調査で得られたデータをもとに、詳細調査を行うべきか否かを判定する。

判定は「2.6 影響評価」に示す手法を用いて行う。

【解説】

- 詳細調査には相応の費用と期間を要することから、事前調査で得られたデータをもとに詳細調査を行うべきか否かを判断できるのが望ましい。

しかし、この段階では数値解析を行えるようなデータはそろっていないことが多いが、「2.6 影響評価」に示す簡易計算手法やノモグラムを用いれば、地下水位、帯水層の厚さ、透水係数、動水勾配、地下水流動方向と構造物がなす角度などの諸条件を与えれば、地下水流動阻害の影響を概略的に算定できる。

このため、これらの方法を用いて詳細調査の必要性を判定するものとした。

- この段階では、机上調査によって得られた情報が中心であるため、情報の量、質ともに十分でない場合が多い。

また、地下水の流動状況は旧河川跡の水みちや周辺の地中構造物などにより局所的に著しく異なる場合もある。

このため、影響がないことが明らかな場合以外は、以降の詳細調査を行うのが望ましい。

- なお、上記に示すとおり工事と地下水との関連については、想定外のことが発生することが少なくないため、詳細調査が不要と判断された場合でも、一定期間は施工中、施工後のモニタリングを行うのが望ましい。

2.3.3.2 調査項目

事前調査の結果を踏まえて、詳細調査の範囲、項目、数量を設定する。

【解説】

- 詳細調査の内容と項目は表 2.4.1 参照。
- 既往の施工事例における調査項目は、表 2.3.8 のとおりである。

これに示すように、水質が重要視されている阪神電鉄西宮の事例では水質が、周辺での地下水利用が多い阪和道堺の事例では井戸調査が重点的に行われており、地域の実情に沿った調査項目を設定する必要がある。

表 2.3.8 既往施工事例での調査項目

事 例	調 査 内 容
名古屋市高速道路	路線と広域的な地質構成、帯水層の分布、透水係数 地下水位(帯水層毎、施工前・中・後)、トレーサー試験(対策工の効果確認)
東京都環状 8 号線	路線と広域的な地質構成、帯水層の分布、透水係数、井戸利用実態 地下水位(水位分布、施工前・中・後)、観測井を用いた流向・流速
JR 仙石線	路線と広域的な地質構成、帯水層の分布、透水係数、地下水流動方向
阪神電鉄西宮	水位(重要箇所は自記式で連続、他は月 1 回) 水質(水温、濁度、pH、水比抵抗、Cl ⁻ 、DO、全アルカリ度、全硬度、Ca 硬度、Mg 硬度、Fe、Mn、COD)
阪和道堺	既存資料の整理、地表踏査、井戸台帳作成、井戸測水調査、水質分析、ため池調査、ボーリング、現場透水試験、揚水試験、試験掘り
京都市地下鉄	路線と広域的な地質構成、透水係数、 地下水位(水位分布、施工前・中・後)

2.4 本調査

本調査は、計画構造物が地下水流動に与える影響を具体的に評価するために実施するものであり、地下水流動保全対策が必要と判断された場合には、その計画、設計時に直接的に反映される。

事前調査が机上の作業を主とするのに対して、本調査は現地作業が主体であるため、この段階では、施行者より地元に対して何らかの形で事業説明がなされていることを前提とする。

本調査には表 2.4.1 に示す内容が含まれる。具体的な調査方法については、下記の成書を参考にされたい。本書では、地下水流動保全の観点で記述する。

【地下水調査に関する参考資料】

- ・ 地盤調査法 地盤工学会 発行 平成 7 年 9 月
- ・ 土質試験法 地盤工学会 発行 平成 12 年 3 月
- ・ 水理公式集 土木学会 発行 平成 11 年 11 月
- ・ 地下水調査及び観測指針(案) 付 地下水観測井及び観測方法(案)
建設省河川局 監修 (社)全国地質調査業協会連合会 発行 昭和 53 年 10 月
- ・ 改訂 地下水ハンドブック (株)建設産業調査会 平成 10 年 8 月
- ・ 最新 地盤調査ハンドブック (株)建設産業調査会 平成 7 年 3 月
- ・ 新版 地下水調査法 山本荘毅著 (株)古今書院発行 昭和 60 年 3 月

表 2.4.1 本調査の内容と項目

分 類	調査項目	内 容	設計への反映
周辺への影響把握調査	水文調査	広域的影響把握	計画ルート、施工深度の決定
	地表踏査	影響範囲と対策範囲	水理施設、重要構造物の有無
	周辺井戸調査	アンケート調査と訪問調査	対策規模と内容の決定
地下水の量に関する調査	地下水位調査	水位変動の有無と原因、工事の影響把握	施工方法、対策工の範囲と種別
	地下水流動調査	地下水の流動性(方向と流速、自由水と被圧水) 水みち(旧河道等)の把握	計画ルート、施工深度の決定 地下構造物の配置、対策工の検討
	帯水層調査	透水量係数、貯留係数	地下水の予測解析に適用
地下水の質に関する調査	水質調査	実態と施工による変化 環境基準	地下水の処理方法、対策工の検討
地下水の集排水機能に関する調査	目詰まり調査	土粒子移動に伴う目詰まり 長期的目詰まり(水質等)	粒度特性と限界流速の設定 集排水設備の能力低下考慮

本調査の位置付けと基本的な流れを図 2.4.1 に示す。本調査は、下記する 4 項目に分類される。

①広域地盤モデル（影響範囲）

地層の連続性を重視した地質断面図を作成する。対象範囲が広範囲にわたるため、地層の成層状態や地下水状態（透水係数と水頭）の類似性に着目し、ゾーニングを行う。境界条件は、河川や海岸などの水理境界と一致させる。

通常、二次元平面／準三次元場の解析に適用される。

②周辺地盤モデル（対策範囲）

施工範囲を含む詳細な断面図を作成する。帯水層の連続性や水頭、地下水の流動性等は、調査結果を優先するが、広域地盤モデルのゾーニング結果とも整合させる。

通常、二次元断面や三次元場の解析に適用される。

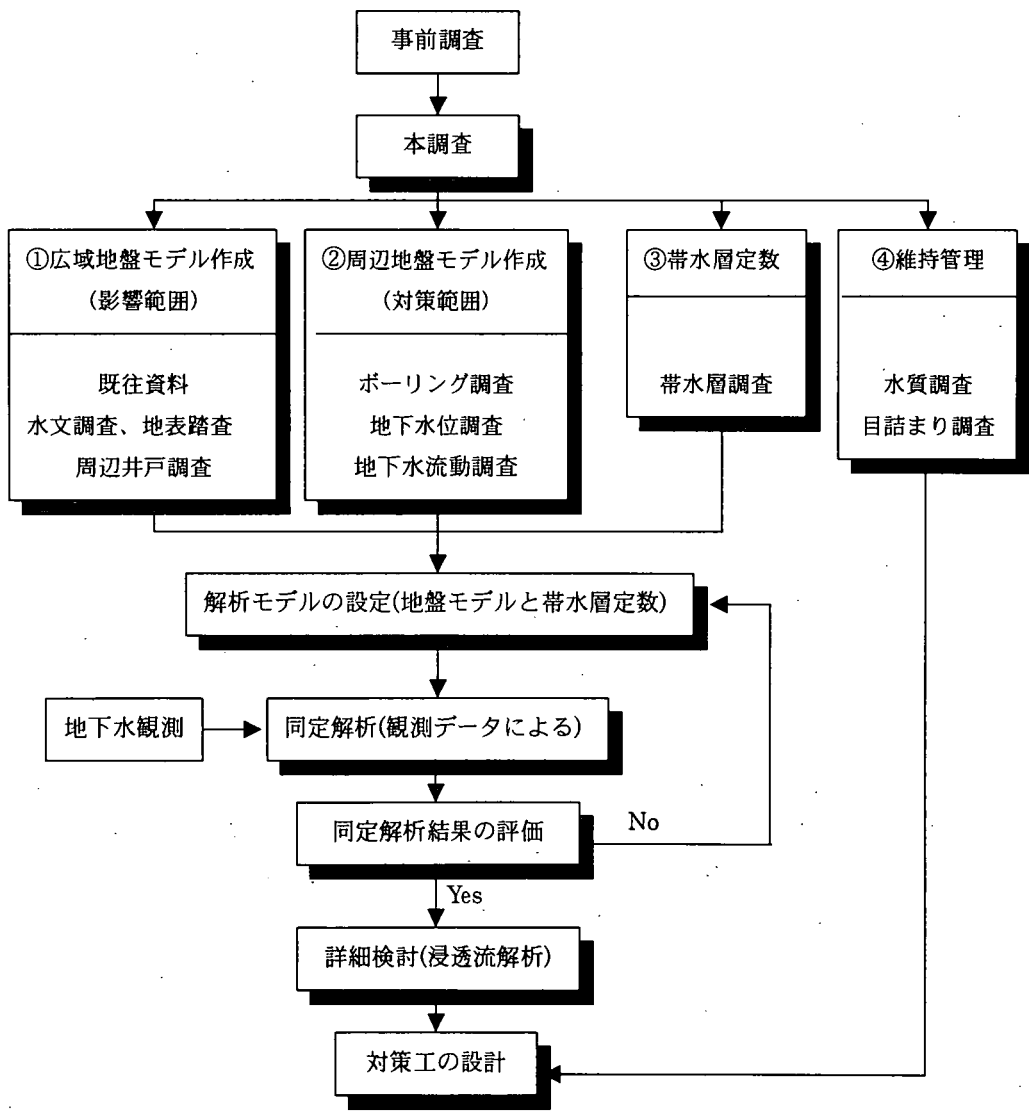


図 2.4.1 本調査の位置付けと基本的な流れ

③帯水層定数

地下水の詳細な解析に必要な入力定数は、表 2.4.2 に示すとおりで、原則として原位置（現場）における試験や室内試験結果にもとづいてモデル化した地層毎に適切に設定する。設定に際しては、地盤の不均質さを十分に考慮するとともに、経験的に知られる値についても勘案する必要がある。

なお、地下水の変動に伴う地盤変状について考察する場合には、地盤の沈下や支持力に関する解析を行う必要がある。基本的な地盤定数と設定方法を表 2.4.3 に示す。

④維持管理

周辺地下水の水質については、施工の前、中、後にわたって追跡し、その保全が適切になされているか確認する必要がある。

目詰まり調査は、対象地盤の粒度特性や地下水の水質を調べ、地下水流動保全対策工の機能に不備が生じないように設計することを目的に行うものである。

表 2.4.2 地下水解析に必要な入力定数

必要な帯水層定数		摘 要	設定方法
影響半径		定常・非定常 浸透流計算	揚水試験や既往の経験式をもとに設定
地下水の水頭			地下水位、地下水流動調査結果をもとに設定
飽和透水係数			透水・揚水試験結果や粒度試験結果に基づいて設定
不飽和 浸透特性	比透水係数		体積含水率と比透水係数(不飽和透水係数/飽和透水係数)の 関係及び体積含水率と負の圧力水頭の関係を示すもので、 実際に求める場合には特別な試験が必要であるが、 通常は既存資料を参照して設定
	水分特性曲線		
貯留係数			揚水試験や既往の慣用値を参考に設定

表 2.4.3 地盤解析に必要な入力定数

必要な地盤定数		設定方法	利用方法
記号	名 称		
γ_t	単位体積重量	室内、現場試験	土中の土被り圧
c	粘着力	一軸、三軸圧縮試験	地盤のせん断抵抗
ϕ	内部摩擦角	N 値、三軸圧縮試験	"
$e - \log p$	間隙比と圧力関係	圧密試験	一次元圧密沈下量
C_v	圧密係数	"	一次元圧密時間
E_c	圧密時の弾性係数	" (mv 値より)	圧密変形
E_s	せん断時の弾性係数	一軸、三軸圧縮試験	せん断変形
ν	ポアソン比	慣用値、三軸圧縮試験	鉛直と水平変位の割合

注：一次元圧密沈下解析、二次元 FEM 非連成弾性解析、円弧すべり解析が対象

2.4.1 水文調査

水文調査は、地下構造物の施工に伴い水文循環が乱され周辺環境に影響を及ぼさないかどうかを検討・評価することを目的として、適切な時期に必要な応じて実施する。調査は、水文地質調査、水収支調査及び水文環境調査に区分して、路線選定、施工計画、施工中並びに施工後の各段階で一連の流れとして遂行される。

【解説】

- ・ 水文調査の概要を表 2.4.4 に示す。事前調査と簡単な現地踏査により、水文上の問題点を把握し、必要な調査項目と内容を表より抽出し、実施する。
- ・ 地下水は、図 2.4.2 に示す水文サイクルの一部として循環しており、気候、地形、地質、土壌、植生等の自然条件と地下水利用等の人為的な条件が複合した地域的条件に大きく左右される。
- ・ 開削工事等の施工に伴う地表水や地下水への影響を水循環と一体化して調べるのが水文調査の目的である。
- ・ 地下水の循環過程における水の需給関係を水収支という。水収支を考える場合、ある範囲を限定すると考えやすい。水文的単位として、周囲を分水界によって囲まれた範囲を考える。
- ・ 分水境界は一般的に平面的には地形的分水界をとるが、図 2.4.3 に示すように水文的分水界と一致しないところでは分水界漏水が生じるため、注意を要する。断面的には、図 2.4.2 に示すように難透水層あるいは不透水層を基盤とする。
- ・ このように平面的、断面的に区切られた地下水の入れ物を地下水盆といい、水収支を考える単位とする。施工に伴う流動地下水への影響を考慮する場合、三次元的な地下水盆を広域地下水のモデルとするのが適当である。
- ・ 地下水流動保全の観点からみると、施工前から施工後にわたる長期間の水収支を考慮し、周辺環境への影響を追跡する必要がある。特に、地下水への影響が大きいと予測された場合には、気象・季節変動と施工の影響を分離できる程度にデータを得る必要があるため、施工前の調査が非常に重要である。

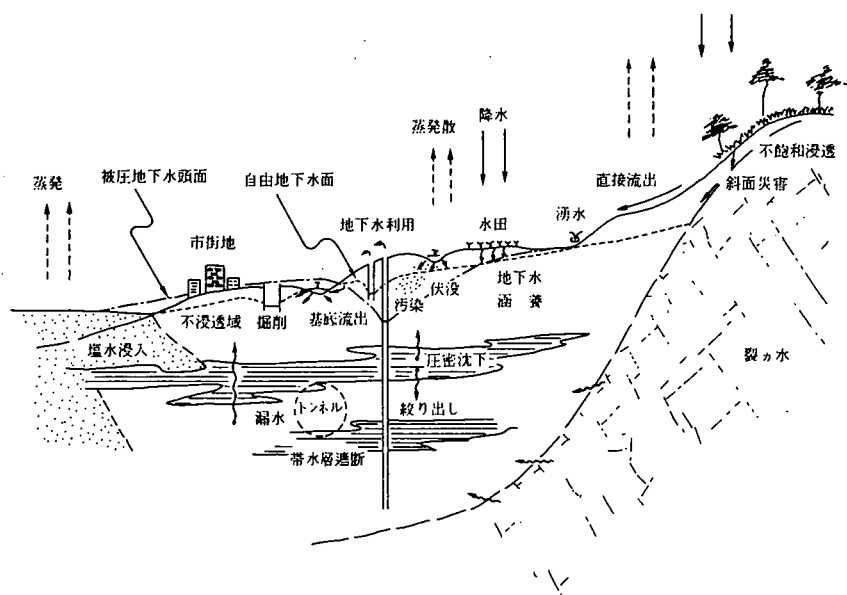


図 2.4.2 水循環と関連要素（最新地盤調査ハンドブック、1995）

表 2.4.4 水文調査の概要(トンネル標準示方書・山岳編、1996 改変)

項目	調査目的	調査内容	調査段階			
			路線 選定	施工 計画	施工 中	施工 後
水文調査の細分	資料	地形・地質・水文・地下水利用に関する資料を収集し、調査地域の水理地質構造、地下水の概要、問題点を把握し、調査計画を立案する。	◎	◎	△	△
	事例	土質条件の類似した地域、近接地域の既往工事を参考に、地下水の影響規模・範囲を評価し、調査方法の適用性を検討する。	◎	◎	△	△
	水文地質	[帯水層の構造]	◎	◎	○	△
		地下水の容器としての水理地質構造(帯水層の分布、規模)、地下水性(自由水、被圧水)等をまとめ、水文地質調査計画を立案する。	○	○	○	△
		ボーリング	○	◎	○	△
		孔内検層	△	◎	○	△
	水収支	[帯水層の特性]	△	◎	△	△
		単孔式現場透水試験	△	◎	△	△
		帯水層の透水係数、貯留係数等の水理定数を評価し、湧水量や影響範囲を予測する。	△	○	△	△
		揚水試験、注水試験	△	△	△	△
水文環境	水収支	調査地周辺の水循環系を把握するため水文気象、表流水、地下水位調査等を実施し、水収支の検討を行い、施工による地下水への影響を予測する。	○	◎	○	◎
		表層水：河川流量、湖沼、貯水地、堰	○	◎	○	◎
		地下水位：観測井、既設井	○	◎	○	◎
予測手法	水文環境	上記調査から考えられる集水範囲および近接地域における水源と水利用の実態を把握し、施工による影響を予測する。	◎	◎	○	○
		水源：河川、湖沼、貯水池、井戸、有効雨量	◎	◎	○	○
		水利用：上下水道、工業・農業用水、ビル用水	◎	◎	○	○
予測手法		施工に伴う湧水の有無、湧水量、湧水範囲及びその集水範囲を予測する。予測手法は、各調査・検討段階における情報の量と質、必要とする予測精度・内容に応じて実施する。	◎	○	△	△
		施工事例による方法	○	◎	△	△
		地形・水文地質条件による方法	○	◎	△	△
		水理公式による方法	○	◎	△	△
予測手法		数値解析による方法	○	◎	△	△

◎:実施すべき調査 ○:実施した方がよい調査 △:必要により実施した方がよい調査

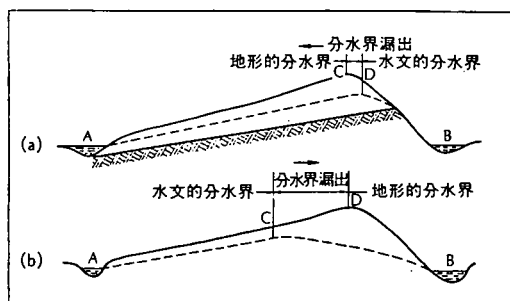


図 2.4.3 地形的分水界と水文的分水界の違い(山本、1983)

2.4.2 地表踏査

(1)目的と範囲

地表踏査は、事前調査により各種の文献・資料や空中写真をもとに概要を把握した後、実施される。現地で地表地質を観察したり、河川の状況や湧水・井戸等の水文情報を把握することを目的とするが、それ以外にも土地利用状況、地下水利用状況や植生等、各種資料を収集するために実施する。踏査範囲は、広域的な「影響範囲」から次第に、施工箇所周辺に限定した「対策範囲」に絞り込む。踏査の結果をもとに、最終的には路線全体の中で集中的に検討すべき箇所を特定する。

【解説】

- ・線状構造物の場合、対象範囲が細長いため得られる調査情報は限定され、路線全体を網羅することができないのが一般的である。効率的に詳細調査を進める上で、踏査は極めて重要である。
- ・地下水流動保全工法は、現時点では平野、台地並びに丘陵地に発達する市街地を想定している。このため、地表踏査の目的は、山岳地で行われる地表地質踏査のように露頭岩盤の性状把握とはニュアンスが異なる。
- ・平野部、台地部及び丘陵部の表層地盤は、通常第四紀層もしくは新第三紀層により構成されている。人工的に地形が改変されている箇所もあり、事前に旧河道を古地図で調べておく必要がある。これらの箇所で、地表地下水の流動状況や湧水の有無を調べる事が重要である。
- ・踏査は、自然の地形地質を対象にするだけでなく、表層地下水の利用状況、各種官民の水理施設の状況並びに植生等を調べることも重要である。
- ・影響範囲は、地下水の涵養源から流出地点の範囲を原則とする。すなわち、山地と平野部の境界付近より、海岸もしくは河川境界付近までとし、広義の水理境界に一致させることが望ましい。
- ・対策範囲は、2.2.2 節で提案した範囲とするが、通常、影響半径が目安となる。

(2)踏査方法

地表踏査は、広域的な「影響範囲」における概査から、対象地域をより絞り込んだ「対策範囲」の精査へと段階を踏んで行われる。概査の段階では国土地理院発行の縮尺 1/10,000～1/25,000 の

地形図が利用される。精査段階では、施行者により作成されたり、地方自治体で発行されている縮尺 1/1,000～1/5,000 の地形図が使用される。

【解説】

- ・概査では調査範囲を一巡し、計画路線を含む広域の地形、地質の概要を把握し、既存資料に基づく地形・地質・水文上の問題点を整理し、現地で直接的に確認する。
- ・特に、現地でみられる崖錐、扇状地、断層地形や褶曲構造等を調べたり、旧地形図をもとに人工的な地形の改変部や地下水が集中する谷地形を確認する。
- ・なるべく多くの露頭から地下水の湧水の有無や地盤の湿潤状態を調べる。
- ・地盤の透水性を把握するために、現地でみられる砂質土層や砂礫層の粒度組成、マトリックスの状態、粒径の均等性、固結度、地下水の状態を入念に調べる。
- ・軟弱地盤地帯では、地盤沈下の状態や液状化の発生事例について調べる。
- ・調査項目として、湧水、井戸、湖沼、河川等の位置、水量、水質並びに有害ガスの発生の有無等が挙げられる。
- ・精査段階では、調査範囲を限定して概査の精度を上げると共に、地下水利用調査を実施する。その内容は、上下水道、工業用水、かんがい用水、ビル用水等の地下水の利用状況について調べる。さらに、その他の用水（酒造用、温泉、信仰の対象など）についても、その利用目的、規模、利用量等を調査する。なお、井戸については2.4.3節による。
- ・成果は所定の縮尺の地形図に地質区分を行い、地形・地質・水文上の特記事項を記載して図2.4.4に示すようなルートマップを作成する。さらに、地下水利用の状況を記載し、後述する帯水層調査等の詳細調査の計画に反映させる。

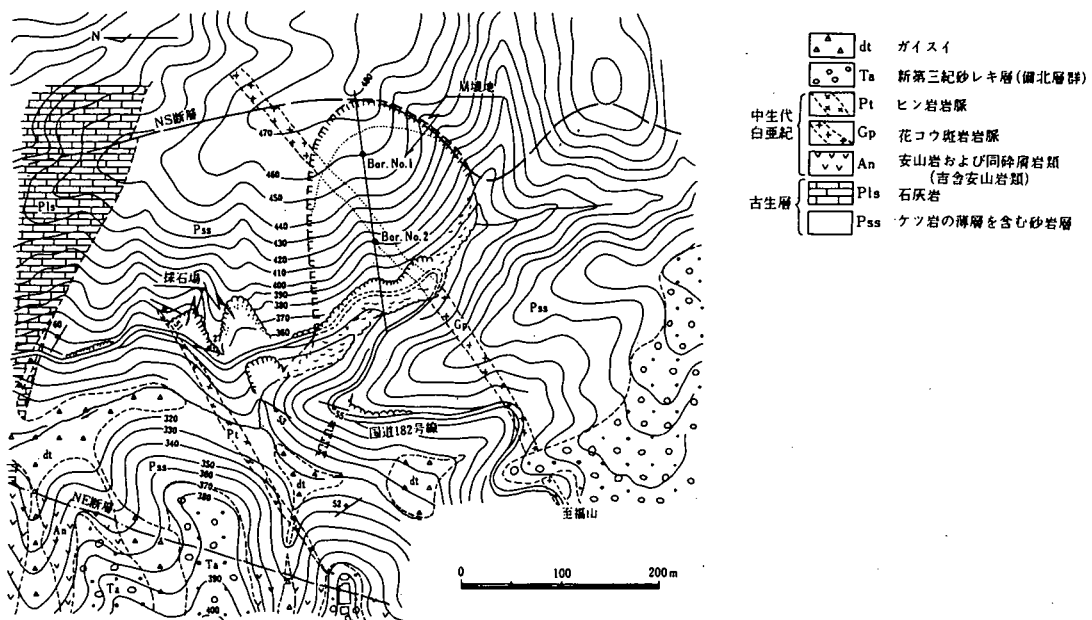


図 2.4.4 現地踏査平面図の例 (最新地盤調査ハンドブック、1995)

2.4.3 周辺井戸調査

周辺井戸調査は、施工による地下水への影響評価と水収支や帯水層の分布、水位、水量などから広域の地下水流動状態を調べる目的で実施する。

調査は、アンケート調査から訪問調査の順で行うが、これに先立ち、地下水利用者や利用状態に関する井戸台帳を作成するのが一般的である。

井戸台帳は、①地方自治体の条例による届け出資料 ②水質管理のための保健所(衛生局)が所有する井戸資料 ③消防など防災目的の井戸資料 等をもとに作成する。

(1) アンケート調査

アンケート調査は、井戸台帳の精度を向上させる目的で実施する。井戸調査を効率的に実施するために、井戸台帳に記載されている事業所や地下水を利用している可能性のある施設に対してアンケート調査票を送付し、井戸の諸元、利用目的、利用量などについて調査する。表 2.4.5 に井戸調査票の一例を示す。個人住宅の浅井戸については後述する訪問調査を原則とする。

(2) 訪問調査

井戸調査票をもとに現地を訪問し、直接的に井戸の確認を行う。事業所や各種施設はもとより、民家についても対象とする。実施の際には、井戸の水位、水質、水温や簡易に水量についても調べておく。この場合、調査時期と工事の施工時期の関係を明確にしておくことが重要である。

(3) 調査結果の整理と利用

調査結果は、地下水利用の実態を把握するもので、工事に伴う影響評価を行う上で最も重要な資料となる。特に、井戸の補償問題が発生した場合には、そのベースとなるものである。そのほか、広域的な地下水の流動状況を判定したり、水収支解析、地下水のシミュレーション解析を行う上での貴重な資料となる。

なお、井戸データは調査時点における瞬間的な資料であり、特に不圧地下水の場合には季節や気象条件に大きく左右されるため広域的に調査する場合には、極力同時期に行うようにする必要がある。

地下水調査データは、本来公開されるべき性質のもであり、多くの人が利用できる形式で整理しておく必要がある。この流れに沿って、全国規模で地下水や井戸のデータベース化が進められている。表 2.4.6 に井戸データの入力例を示す(丸井ら、1996)。

表 2.4.5 井戸調査票の一例

地区名			地点番号		
所有者名			住所	丁目 - -	
調査日時	平成 年 月 日	時	天候		調査員氏名
井戸の型式	1.打込 2.手堀井戸 3.機械掘 4.自噴・湧水 5.横孔集水 6.その他()				
井戸の設置年月	明治 昭和 大正 平成	年 月	使用状況	1.毎日使用 2.時々使用 3.未使用 4.その他() 使用量 m ³ /日	
取水施設	1.水中ポンプ 2.サクシヨンポンプ 3.手押しポンプ 4.つるべ 5.自噴 6.その他()				
使用目的 (使用状況項の 1及び2のみ)	1.飲料水 2.洗濯・生活雑用水 3.クーラー用 4.養魚用 5.水田用 6.畑地等かんがい用 7.工業用 8.工業用雑用水 9.その他()				
使用量	1.家族人数(人) 2.農地の場合 かんがい面積(m ²) 3.その他()				
井戸の諸元 (井戸の型式の 1～3の場合)	<p>《実測》 地表よりの地下水位(H) h-d = m l = m 地下水位標高: TP = m h = m 井戸深度(L) l-d = m d = m 湛水深(W) l-h = m 2r = m</p> <p>注1) 地盤高は の地形図より読みとる。 TP: m 注2) 採水位置(×印) 地下水面より m地点(TP: m)</p>				
井戸の水利地質	地 形	1. 沖積地 2. 河川に近い(30 m以内)沖積地又は洪積地 3. 段丘 4. 扇状地 5. 丘陵 6. 山地 7. 山間低地 8. その他()			
	地 質	1. 沖積層(イ.腐植土・砂互層 ロ.粘土砂互層 ハ.砂 ニ.砂礫) 2. 洪積層(イ.腐植土・砂互層 ロ.粘土砂互層 ハ.砂 ニ.砂礫) 3. 岩 盤(イ.岩盤の風化帯・崩積土 ロ.割れ目の多い岩盤)			
地下水位の状況	1.水量は多く枯れたことがない。 2.季節によって枯れることがある。 3.最近枯れやすくなった。 4.その他()				
地下水 水質の状況	1.生水で使用している。 2.色、味が悪く沸騰してから使用。 3.水質が悪く使用していない。 4.その他()				
上水道 の普及状況	1.上水道は入っていない。 2.上水道と併用 (イ.主に上水道利用) ロ.主に地下水利用				
下水道 の普及状況	1.下水施設あり。 2.し尿類の自家施設あり。 3.普及していない [イ.汲取り ロ.堆肥利用 ハ.その他()]				
井戸周辺の土地 利用状況(井戸 より半径 30 m範 囲)	1.住居地 2.商業地 3.工業 4.農地 5.その他()				
備 考					

表 2.4.6 井戸データ入力例（丸井、1996）

井戸データ入力

台帳番号

行政区

県名

コード/名称

地名/番地

管理者

地図

メッシュコード

経度

緯度

完成日

使用目的

深度

λHV-F

口径

自然水位

揚水水位

揚水量

自噴量

水温

pH

塩素

鉄分

蒸発残留物

地層区分

地層備考

Start

End

Start

End

Length

メモ

2.4.4 ボーリング調査

ボーリング調査は、対象区間の地盤モデルを作成するために行うものであり、採取試料をもとに土質判定を行い、地盤構成を明らかにする。さらに、ボーリング孔を利用して表2.4.7に示す試験や検層を、適宜実施する。

通常、複数のボーリングデータより帯水層の伏在深度、層厚や平面的な連続性などを明らかにする。一般的に工事の影響は、地表面に近い帯水層ほど強く受けるが、不透水層を介して、その下位に分布する帯水層についても検討を要することが多い。ボーリング調査深度は、その点を考慮して決定する。

一例として、図2.4.5に大阪の上町台地の東西断面を示すが、丘陵地や台地では、地層は傾斜していることが多い。平野部でも地質構造が複雑な地域では、地層の連続性を評価することは容易なことではない。このような場合には、表2.4.7に示す調査を行い、地層の類似性を調べるのが重要である。ボーリング掘削孔径は、実施する孔内試験の種類により決まる。

ボーリング孔を利用して地下水調査を行う場合に留意すべき点は、試験区間の孔壁や孔底の洗浄である。被圧水を対象にする場合には遮水を実行に行い、上下の帯水層を分離することが重要である。調査孔を観測孔として使用する場合にも、対象とする帯水層を明確にし、同様の配慮が必要である。

地下水観測孔としない場合には、ボーリング孔の埋め戻しが必要である。埋め戻しが不十分な場合は、本工事で地下掘削した時に、地下水が湧水し、工事に支障をきたすことがある。このため、調査終了後は、セメントスラリー等で孔底から孔口まで閉塞しておく。

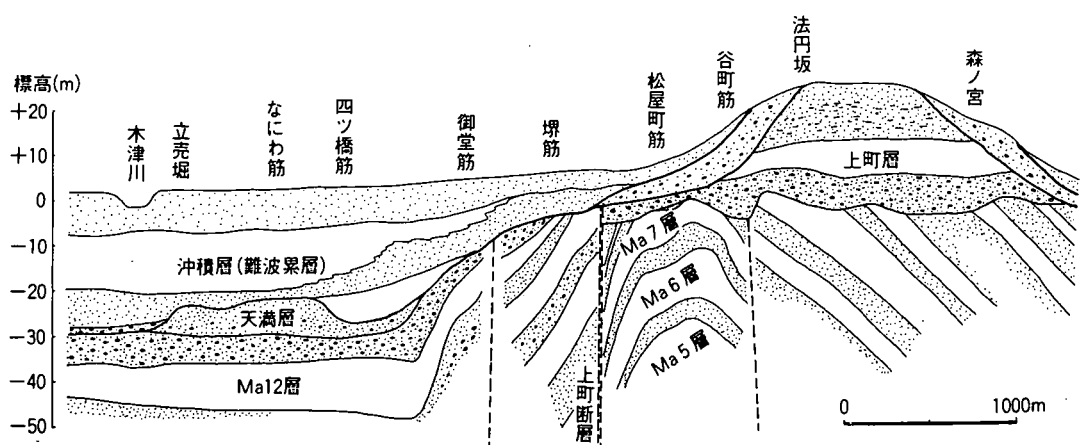


図 2.4.5 上町台地北部の東西地質断面図 (市原、1993)

表 2.4.7 ポーリング孔を利用した調査

分類	調査・試験名		試験基準	得られる項目
原位置 試 験	標準貫入試験		JIS A 1219	帯水層の分布,N 値,乱した試料
	現場透水試験		JGS 1314	平衡水位と透水係数
	揚水試験		JGS 1315	透水量係数,貯留係数,影響半径,帯水層の連続性
	湧水圧試験		JGS 1321	岩盤の平衡水位と透水係数
	ルジオン試験		JGS 1323	岩盤の透水性,ルジオン値
	地下水位測定		JGS 1311	自由水と被圧水の水頭位置と変動状況
	流向流速測定		—	地下水の流向流速
検層	地下水検層		—	帯水層の分布、水みち
	電気検層		JGS 1121	帯水層の分布
	温度検層		—	地温、水温
採取	サンドサンプリング		JGS 1223	砂の不攪乱試料→室内透水試験
	地下水の採水		—	帯水層の試料
室内 試験	土質	土粒子の密度	JIS A 1202	特殊土の判定、粒度試験の整理
		含水比	JIS A 1203	含水量、細粒分含有量、粒度試験の整理
		粒度	JIS A 1204	細粒分含有量、透水係数の推定
		透水試験	JIS A 1218	粗粒土の透水係数
	水質	水質試験	—	環境基準項目
観測	地下水位観測		JGSA 1312	長期的な地下水位変動

JIS:日本工業規格

JGS：地盤工学会基準

2.4.5 地下水位調査

(1)目的

地下水調査の基本は水位測定であり、その目的は、水位変動を平面的に、また、経時的に調べることにより、その原因が自然現象によるものか、施工による人為的な要因によるものかを明確にすることである。このため、測定は地下工事の計画段階、施工中並びに施工後も継続して実施する必要がある。計画段階では路線の線形や施工深度を決定する資料として、施工中の観測は施工管理の一環として行われる。施工後は地下水の環境保全を確認する目的で実施される。特に、地下水の流動障害が想定される帯水層の水位測定が最も基本的な項目である。

【解説】

- ・水位測定は、施工に際し実施される地下水のシミュレーション解析や水収支解析を進める上で、最も基本的なデータを提供する。
- ・多数の測定地点で一斉に水位を測定することにより、地下水面等高線図や流線網が作成される。 図 2.4.6 に調査事例を示す（地下水ハンドブック、1998）。
- ・これより、地下水の流動方向をマクロ的に推定することが可能となり、地下水の流動保全を図る上で、最も重要な資料となる。
- ・長期的な水位変動を調べることにより、潮位、気象、季節変動等の自然要因と地下掘削に伴う人為的な要因を区別することができる。
- ・長期の地下水位変動図と工事場所に近い雨量観測地点のデータを対比することにより、施工の影響を調べることができる（杉本、1996）。

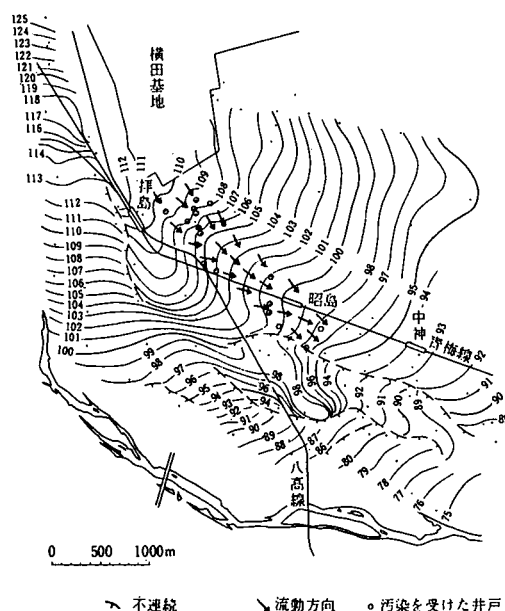


図 2.4.6 地下水面等高線図の一例（地下水ハンドブック、1998）

(2)方法

地下水位の測定は、測水調査として古くより実施されてきた。測定は一斉測水のような短期的なものと時系列のデータを得る目的で行う長期的なものがある。

【解説】

- ・地下水位の測定に先立ち、水準測量により観測地点の標高を調べておく必要がある。
- ・水位観測は、既設の井戸や専用に設置された地下水観測井戸が一般的に用いられる。
- ・水位測定は、個別にテストと電気コードにより確認する方法と自記水位計により継続的に測定する方法がある。
- ・既設井戸を利用する場合は、前者の方法によることが多い。
- ・観測用井戸の場合は後者の方法により長期的、連続的に測定することが可能である。
- ・測定は施工深度付近に分布する浅層地下水を対象とするため不圧地下水が一般的であるが、施工位置によっては被圧地下水を対象とすることもある。この場合、対象とする帯水層を事前に明確にしておき、他の帯水層と遮断しておく必要がある。
- ・被圧地下水の場合、施工の影響を受けると不圧地下水と比較して影響が広範囲に、しかも短時間に生じるため、水位や水圧の連続的な観測が重要である。
- ・単一の観測孔で、複数の帯水層の水位変動を水圧計により連続的に測定する多層水圧測定方法も提案されており、必要に応じて適用される（三宅ら、1999）。

2.4.6 地下水流動調査

(1)目的

山地～丘陵地や丘陵地～低地といった地形の変換部では傾斜面が形成されており、表層地下水が流動していることがある。この場合、事前に地下水の流動方向や流速程度を調べ、保全すべき地下水の状態を明確する必要がある。地下水流動調査は地下水の流動状況を定量的に把握し、施工に伴う影響評価を行う上での資料を得ることを目的とする（出口ら、1996）。

【解説】

- ・ 地下水の流動形態は、地形・地質と密接に関係する。このため、事前調査段階で地下水の流動性の判断は可能である。
- ・ 地下水の流動状況は、動水勾配や流速の形で具体的に示される。また、流動方向もマクロ的に把握することが重要であり、この目的で地下水流動調査が実施される。
- ・ トレーサ試験の場合、トレーサ注入井戸と採水井戸の組み合わせで比較的広範囲にわたる地下水水系を評価できる。
- ・ 浅層地下水の流動は、水みち的流動に大きく規定される場合がある。特に、旧河道中の地下水流動が周辺部に比較して高速であることが知られている。図 2.4.7 にトレーサ試験により確認された高速地下水流動の調査例を示す。
- ・ 均質地盤の仮定のもとに推定された透水係数で予想されたトレーサの到達時間が 140 時間であるのに対して、実際にはトレーサ投入後、7 時間で到達し 10 時間後にトレーサ濃度がピークに達している。到達時間で約 20 倍の違いがみられ、水みち的流動が確認されている。
- ・ ボーリング孔を利用した多点温度検層により深度方向の地下水の流動性を調べた例を図 2.4.8 に示す。この方法は、孔内にお湯を注入し、孔内温度を強制的に高め、この復元状況を時系列的に捉えることで、地下水の流動層を調べるものであり、流動が激しい箇所は温度変化が著しく現れる。図より、同じ礫層であっても地下水の流動状況に違いがみられる。
- ・ 図 2.4.7、図 2.4.8 より、平面的にも断面的にも地層中に水みちが存在することを示唆しており、地下水の流動がそれに支配されている様子が伺える。

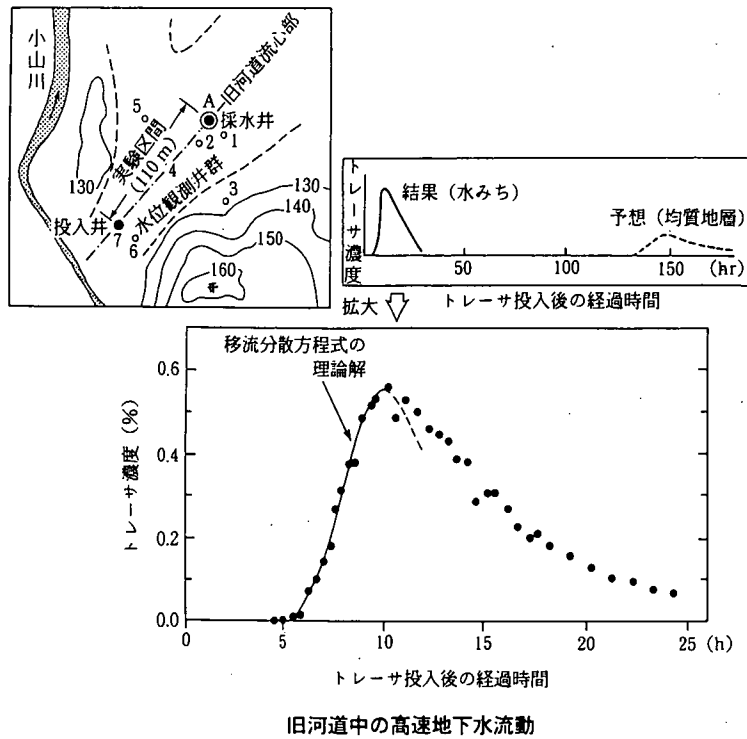
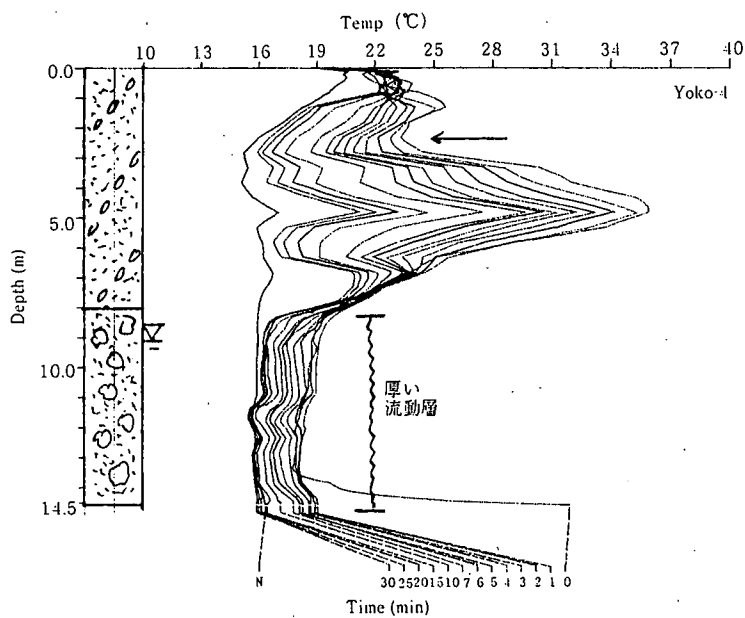


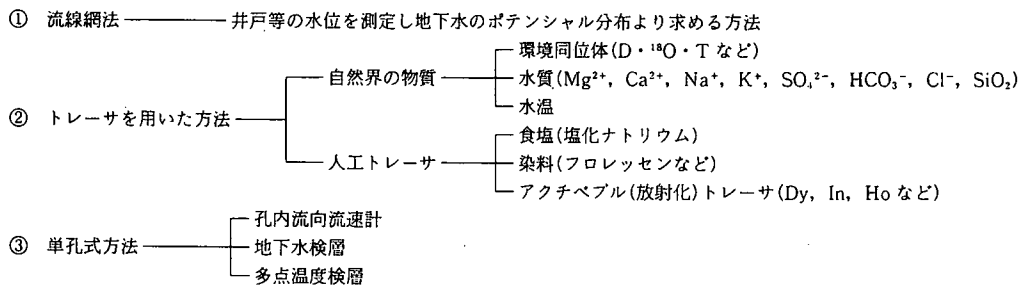
図 2.4.7 旧河道中の高速地下水流動(土の影響圏、1997)



(2)方法

地下水流動調査は、表 2.4.8 に示すように、①流線網法、②トレーサを用いた方法、③単孔式方法の3種類に大別される。

表 2.4.8 地下水流動調査の方法(上田、1996)



【解説】

- ・ 平面的な水位分布より、流線網法により地下水の流動性を評価するもので、最も基本的なものであり、他の調査法の結果も水位分布からの推定と照合しておく必要がある。
- ・ 水位測定結果を整理する上で、三次元的な広がりをもつ地層断面を推定し、地下水位の観測対象層がいずれの地層に相当するのかを明確にしておく必要がある。動水勾配や流動方向は、同一帯水層のデータをもとに考察することを前提とする。
- ・ 帯水層の三次元的な広がりを調べるために、物理探査が有効に実施されることがある。地下水調査に利用される物理探査を表 2.4.9（地下水ハンドブック、1998）に示す。
- ・ トレーサ法には、食塩や色素等の無害の人工トレーサを用いる場合、トリチウム等の環境同位体を利用する場合 さらに、複数の水質項目に基づく水質特性から流動方向を推定する場合等がある。
- ・ 単孔式方法は、ボーリング孔を利用するもので、孔内流向流速測定、地下水検層並びに多点温度検層がある。
- ・ いずれの方法も単一のボーリング孔で実施できるという手軽さはあるが、点の調査であるため測定地点近傍の限られた範囲での情報しか得られない欠点がある。特に、市街地では地下水の利用や処理が行われていることが多い。人為的な影響が懸念される場合には、本法の適用は制約される。
- ・ 孔内流向流速測定には数種類の方法が提案され、実用化されている(例えば、平山、1994)。上記した留意点を考慮に入れた適用であれば、他の結果とも照合することで有効な情報を提供する。
- ・ 地下水検層と多点温度検層は、孔内に投入された食塩の希釈程度や熱湯の温度変化程度より帯水層中の水みちを調べるもので、流速や流動方向は調べることはできない。

表 2.4.9 地下水調査に利用される物理探査（地下水ハンドブック、1998）

探査の区分・名称			利用する物理現象	求まる物理量	主な適用対象
地表探査	電気探査	一次元比抵抗探査	定常電導現象	比抵抗の深度分布	地質の判別と地質構造
		二次元比抵抗探査		比抵抗の二次元分布	
		自然電位法	自然分極現象	分極強度と位置	地層境界や地下水流の概略推定
	電磁気探査	EM法（ループループ法）	電磁誘導現象	比抵抗異常箇所	地層境界や岩盤内亀裂の推定
		MT法	電磁誘導現象	比抵抗の二次元分布	地質の判別と地質構造
	弾性波探査	屈折法探査	波動現象（屈折波）	弾性波速度層分布	
		反射法探査	波動現象（反射波）	弾性波反射面分布	詳細地質構造
孔間探査	弾性波トモグラフィ		波動現象	弾性波速度や減衰率の二次元分布	詳細地質構造および岩盤内亀裂分布の推定
	比抵抗トモグラフィ		定常電導現象	比抵抗の二次元分布	
	電磁気（EM）トモグラフィ		電磁誘導現象		
孔内検層	電気検層	比抵抗検層	定常電導現象	比抵抗	地質・水質の判別とストレーナー位置の決定
		自然電位検層	自然分極現象	自然分極	
	速度検層	ダウンホール法	波動現象 （直接波、屈折波）	弾性波速度と減衰率	地質の推定と破砕部の検出
		サスペンション法			
		ソニック法	音波伝播現象	音波速度	破砕帯の検出
	放射能検層	自然放射能検層	自然放射線	自然放射能	地質や断層帯の判別
		γ-γ検層	γ線散乱吸収現象	体積密度	帯水層の評価（間隙率等）
		中性子検層	中性子線散乱現象	含水率	
	流速検層	スピナー型	スピナーの回転	孔内流体速度	湧水・逸水層の検知。透水性評価とストレーナー位置決定
		ヒートパルス型	熱パルスの移動		

2.4.7 帯水層調査

(1)目的

帯水層調査は、帯水層の水理特性（透水係数、貯留係数など）を調べる目的で実施する。

調査結

果は地下水の各種の解析に適用される。調査法は、①現場透水試験、②揚水試験、③注入試験、④室内土質試験に大別される。

【解説】

- ・ 帯水層の水理特性を調べ、地下水解析に必要となる水理定数を決定することが、帯水層調査の目的である。
- ・ 複数の帯水層間に介在する粘土層の連続性や不透水性を確認するために、揚水試験中に揚水層以外の帯水層でも水圧や水位変動を計測することで地層の連続性を評価することができる。その事例を紹介する(玉野ら、1995)。図 2.4.9 に揚水試験地点の地層断面図を、図 2.4.10 に揚水井 P-1 の揚水時の各観測井における地下水位変化図を示す。さらに、表 2.4.10 に P-1, P-2 の揚水に伴う水位変化の有無を示す。表より、測点 1, 4, 7, 9 と測点 3, 6, 8 にグループ分けでき、それぞれで共通した動きがみられ、各測点の帯水層が連続していると判断された。これを踏まえて、当初、図 2.4.9 の破線で想定された地層断面が、揚水試験結果をもとに図中の実線のように変更され、No.B 付近で撓曲構造が明らかにされた。これと類似した事例報告もみられる。(例えば、太田ら、1999)
- ・ 帯水層の透水性を評価するために、地下水を汲み上げる方法と揚水した地下水を地盤に復水する場合の注入能力を調べる注入試験がある。
- ・ 地下水の解析条件に合致した試験を選定することが重要である。
- ・ 試験は、不圧地下水と被圧地下水を対象とする場合とでは方法も結果の解析も異なる。施工がいずれを対象にするのかによって選定する必要があるが、通常は不圧地下水が対象となる。

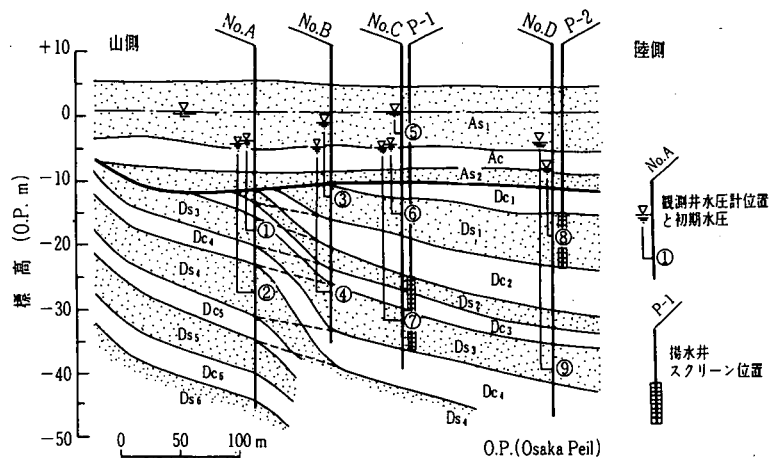


図 2.4.9 地層断面図、揚水井、観測井地点と初期水圧の説明図（玉野ら、1995）

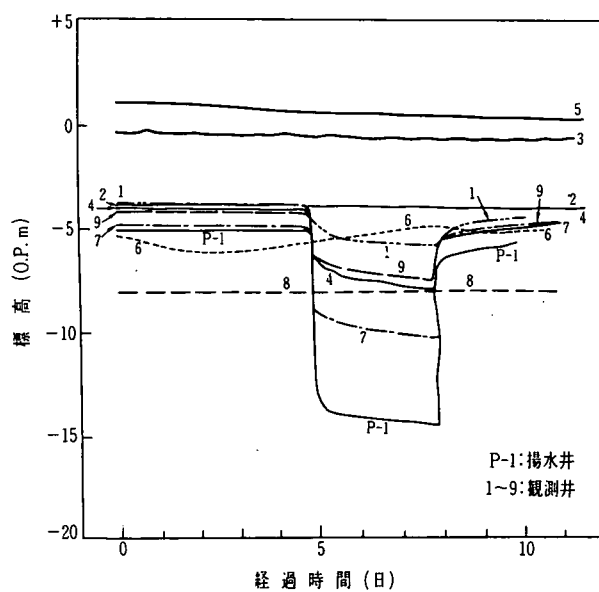


図 2.4.10 揚水試験時の揚水井および観測井での水位経時変化（P-1 揚水井の場合）
（玉野ら、1995）

表 2.4.10 揚水試験から求まる地下水の連続性の整理結果表（玉野ら、1995）

観測井 水圧計 No.	A		B		C			D	
揚水井	1	2	3	4	5	6	7	8	9
P-1	○	×	×	○	×	×	○	×	○
P-2	—	—	○	×	×	○	×	○	×

注) —印は測定値なしを示す。

(2)方法

帯水層試験は、表 2.4.11（河野ら、1979）に示すように対象地盤の透水性に応じて、直接法と間接法がある。直接法には揚水試験、現場透水試験があり、間接法には現地より採取した土質試料について行う室内土質試験がある。各試験方法の内容、得失を表 2.4.12、表 2.4.13 に示す。

表 2.4.14 には、原位置透水試験法の現状をまとめる。さらに、図 2.4.11 には、現場透水試験法の種類をまとめる。

【解説】

- ・現場透水試験は、単一のボーリング孔内の水位を変化させて、水位の回復状況を観測する試験であり、簡易に実施できるために事前の調査ボーリングを利用して行われることが多い。
- ・本試験により、自由水や被圧水の水頭と透水係数が得られる。水頭は試験を行った翌朝水位を平衡水位とみなして算定されるが、その信頼性は比較的高い。一方、本試験により得られる透水係数は、試験法や用いる解析式を誤用すると、大きな誤差を含むことがある。（大東、1990）
- ・この原因として、ボーリング孔内や孔底の洗浄不足、孔壁の目詰まり、さらに試験区間にシルトや粘土の薄層が分布する場合、その影響を直接的に受けること等が挙げられる。さらに、試験時に、過度の水位変化を発生させた場合、孔内でボイリングが生じ、試験区間の保孔が確保できず、その結果、透水係数の算定式が試験条件と異なることにもなる。
- ・これらの問題点に対処するために、現場透水試験用にストレーナ付きの試験孔を清水掘りで施工することによって、精度よく試験を実施する試みも行われている（黒山ら、1993）。
- ・試験時に大きな水頭差を与えるとボイリングが生じる。水頭差を小さくして試験を行う配慮が必要である。
- ・礫層のような透水性の高い地層の場合、孔内水の汲み上げ後、瞬時に水位が回復するため事前に間隙水圧計を設置するなどして、揚水初期の水位回復データを精度よく測定する必要がある。
- ・単孔式の現場透水試験は留意点が多いため、試験結果を評価する際には、同一帯水層の既往資料や粒径から推定される透水係数も参考に、総合的に判断することが肝要である。
- ・揚水試験は、揚水井と複数の観測井を設置して実施するもので、広がりをも有する地盤の平均的な透水性を知る上で最も信頼性の高い試験である。
- ・市街地で揚水試験を行う場合には、事前に周辺での地下水利用状況を調べ、試験結果に与える影響を把握しておく必要がある。
- ・注入試験は、地盤中に地下水を復水する場合に行うもので、地下水流動保全工法と直接関係する試験である。地盤の注入能力や目詰まりについて事前に確認するために実施す

る（永井ら、1995）、（阪神電鉄,大阪土質ら、1984）。

- ・地盤の透水性は、土の粒度配合、土粒子の径と形状、締め具合、間隙比、初期含水比等により支配される。室内試験ではすべてを再現することができないために、試験結果は地層の透水性を判断する上での参考資料として用いられることが多い。
- ・室内土質試験は、通水層に用いられる埋め戻し材料の透水係数を設定する場合等にも実施される（生田ら、1995）。

表 2.4.11 土質と透水係数（河野、西垣、1979）

		透水係数 k (cm/sec)													
		10 ²	10 ¹	1.0	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹		
排水状態		きわめて良い			良				い			良くない		きわめて悪い	
土 質 状 態	きれいな砂利	きれいな砂		きれいな砂利 まじりの砂		細砂、有機質および無機質シルト、砂とシルトと粘土の混合土、粘土質堆積層								不透水性土 深い粘土層	
		植物の育生と風化作用をうけた不透水層													
直接試験方法	現地揚水試験														
	定水位透水試験														
								変水位透水試験							
間接試験方法	粒度分布と間げき比から算定														
								水平毛管流試験				圧密試験から算定			

表 2.4.12 代表的な帯水層調査方法

試験名	方 式	適用地盤	試験・解析方法	成果
揚水試験	多孔式	同上	平衡法、非平衡法	透水係数,貯留係数 影響圏
現場透水試験	単孔式	砂質土、礫質土	定常法(揚水法、注水法) 非定常法(回復法,注水法)	透水係数 水頭(間隙水圧)
注入試験	単孔式	同上	〃	注水能力
室内土質試験	透水試験、粒度試験、圧密試験	砂質土、礫質土、粘性土	ヘーゼン式、クレーガ式 JIS A 1217	透水係数

表 2.4.13 帯水層調査方法の得失

試験方法	長 所	短 所
揚水試験	最も精度の高い調査法であり、透水係数、貯留係数、影響半径など、地下水解析に必要な帯水層定数を全て求めることができる。	試験費用が多額であり、試験時間も長時間を要する。市街地では、近接の地下構造物の存在や他の建設工事などの人為的な影響を受けやすい。
現場透水試験	試験方法を適切に選択すれば、費用も安く、手軽である。施工実績も多い。周辺の影響を受けにくい。	ボーリング孔周辺の地盤状況に左右されるため、施工範囲全体の地盤の透水性を反映しないケースもある。透水性の高い礫層について、定常法では揚水や注入が困難であり、非定常法では、水位の回復が瞬時であるため、計測が困難である。
室内試験	費用が廉価であり、透水性の目安を得るために、手軽に実施できる。	原位置地盤の拘束圧、密度を再現して試験を実施できないため、得られる値は参考にとどまる。

表 2.4.14 原位置透水試験法の現状

分類	方法		土質		試験費	実施頻度
			砂質土	礫質土		
揚水試験	多孔式		●	●	×	▲
現場透水 試験	ピエゾ メータ法	回復法	●	▲	●	●
		注水法	▲	×	●	▲
		揚水法	▲	●	▲	▲
		孔内加圧法	×	●	▲	×
		金属棒取出し	×	●	▲	×
	JFT		●	●	▲	▲

注：●…良 ▲…普通 ×…不良

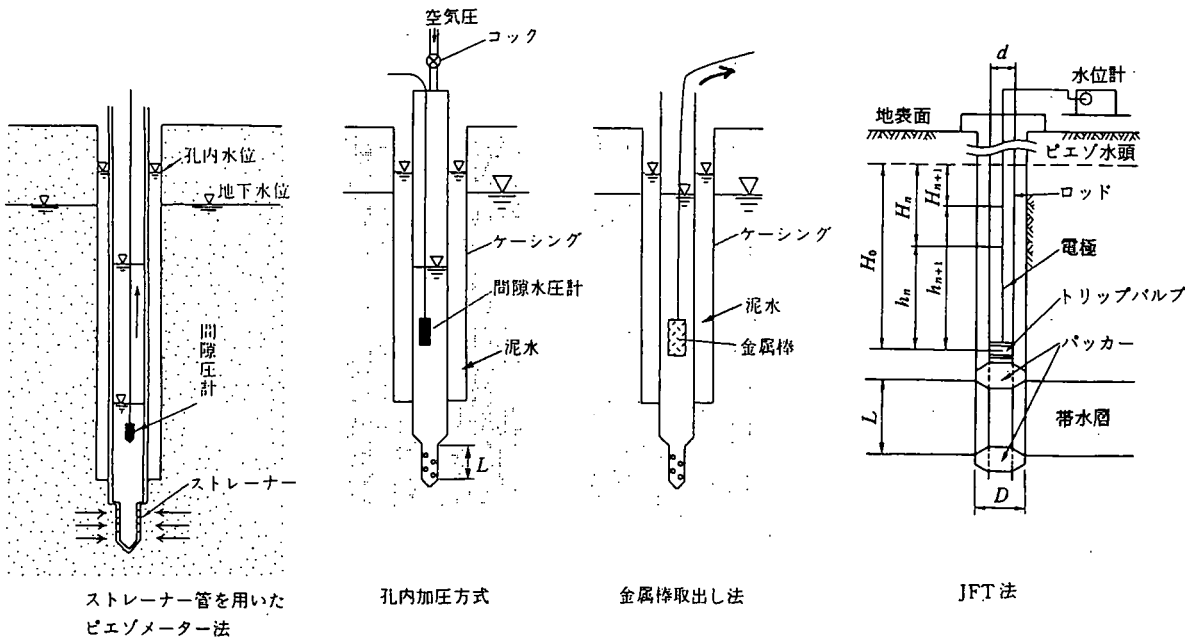


図 2.4.11 各種現場透水試験方法（西垣、1993 を一部修正）

2.4.8 水質調査

地下水の水質調査を平面的に、また時系列的に行うことにより、環境保全の観点から水質変化の状況を追跡することができる。この場合には、各機関により検査項目と基準が定められており、それをもとに、適否や適合性を検討することができる。

一方、広域的に水質を調べることにより、地下水の流動状況や沿岸地域における塩水化の程度を調べることも行われる。

水質分析の項目は、調査の目的に応じて異なる。検査基準をもとに水質を調べる場合(水質検査)と地下水の流動状況を調べる場合(水質調査)に分けて分析項目を比較すると表 2.4.15 となる(地下水ハンドブック、1998)。基本的な水質分析内容として表に示す項目が挙げられる。

近年、環境基準の改正が頻度高く行われているため、水質検査を行う場合には、最新の項目と基準値を用いる必要がある。最新の基準は、関係の参考図書をみられたい(例えば、通商産業省環境立地局、2000)。

目詰まり対策や塩水化等、その目的を限定して行うこともあり、2.4.9 節、2.5.1 節を参考に項目を決定することになる。

表 2.4.15 分析項目の比較(水質検査と水質調査)(地下水ハンドブック、1998)

水 質 検 査*			水 質 調 査	
(分 析 項 目)	(表示法)	(基準値**)	(分 析 項 目)	(表示法)
水温	℃		左に同じ	左に同じ
pH		5.8~8.6		
導電率	mS/cm			
<u>健康に関する項目</u>			ナトリウムイオン (Na ⁺)	mg/l, me/l
一般細菌	個数/ml	100	カリウムイオン (K ⁺)	mg/l, me/l
大腸菌	MPN	検出せず	カルシウムイオン (Ca ²⁺)	mg/l, me/l
硝酸性および亜硝酸性窒素	mg/l	10	マグネシウムイオン (Mg ²⁺)	mg/l, me/l
フッ素イオン	mg/l	0.8	[鉄イオン] (Fe ²⁺)	mg/l, me/l
その他25項目			[マンガンイオン] (Mn ²⁺)	mg/l, me/l
<u>性状に関する項目</u>			[アンモニウムイオン] (NH ₄ ⁺)	mg/l, me/l
ナトリウムイオン	mg/l	200	陽イオン合計	me/l
鉄	mg/l	0.3	炭酸水素イオン (HCO ₃ ⁻)	mg/l, me/l
マンガン	mg/l	0.05	塩化物イオン (Cl ⁻)	mg/l, me/l
塩化物イオン	mg/l	200	硝酸イオン (NO ₃ ⁻)	mg/l, me/l
カルシウム、マグネシウムなど(硬度)	mg/l	300	硫酸イオン (SO ₄ ²⁻)	mg/l, me/l
蒸発残留物	mg/l	500	陰イオン合計	me/l
有機物など (COD)	mg/l	10	ケイ酸 (SiO ₂)	mg/l, mmol/l
その他10項目				

* 飲料適否試験(水質基準の主要なものをあげる)。 ** 数値以下。

2.4.9 目詰まり評価のための調査

地下水流動保全工法の集水・涵養装置近傍では以下の要因による目詰まりが発生することが想定される。

- ・土粒子の移動により発生する初期目詰まり
- ・水中、地盤中の懸濁物質の抑留、蓄積による長期目詰まり

これらの目詰まり性状を評価し、設計に反映するための調査について述べる。

(1)土粒子の移動による目詰まり防止のための調査

地盤中の地下水流速が局所的に大きくなる場合、地盤中の細粒分が移動して透水性が変化する可能性がある。特に、遮断構造物の下流側における涵養装置近傍では、大きな流速により移動開始した細粒分が、涵養装置から一定距離離れたゾーンで流速低下して抑留され目詰まりの原因になるといわれている。このような目詰まりは、運転開始後、初期の段階より発生するため初期目詰まりとして位置づけられる。

この目詰まりを防止するために、地盤の粒度組成を粒度試験により調査し、この結果として得られる D_{10} あるいは D_{20} などから土粒子移動に関する限界流速を定め、集水・涵養装置近傍での流速が限界流速以下での運転になるように設計する。

土粒子の移動による目詰まり防止基準を満たす設計を行うためには、

- ・対象帯水層の深度 1m ごとのサンプリング
- ・各試料の粒度試験 (D_{10} , D_{20} の評価)
- ・ D_{10} , D_{20} に基づく限界流速の設定

などの調査・設定を行う。

土粒子の粒径と限界流速の関係として種々の実験式、理論式が提案されている（たとえば杉井ら 2000 など）。ただし、これらの多くは鉛直上向き流れに対するものであることに注意が必要である。集水・涵養装置近傍での地下水のような水平方向の流れに対しては、鉛直上向き流れの 1/4～1/3 程度の限界流速になるといわれている。

原位置で限界流速（注水量）を求める方法として、実際に対策工法で用いる集水・涵養装置を設置し、これに対して段階注水試験を行うことが有効である。この試験は、設置した涵養装置に対し注水量を段階的に増加させてゆき、このときの注水量 Q と装置内水位上昇量 s_w の関係を Q_{sw} プロットとして整理するものである。このプロットの変曲状況から涵養装置に対する限界流量を設定する。限界流量を超えた注水を行うと、土粒子の移動による目詰まりの発生により涵養装置内の水位上昇量が急激に大きくなることから限界流量が判定できる。

(2)長期的目詰まり進行予測のための調査

長期的目詰まりによる能力低下を考慮して設計するためには、目詰まりによる能力低下がどのように進行するかを予測・評価しなければならない。長期的目詰まりの発生要因として、①注入水中の懸濁物、②帯水層内での化学反応、③井戸または帯水層での微生物の増殖、④注入水中の空気、⑤帯水層に水を注入するときに起こる土粒子の再配列などが挙げられ、これらが複合的に影響していることが考えられる。

長期的目詰まりに影響をおよぼす要因としては、

- ・ 水質：藻類、微生物などの存在、鉄・マンガン・カルシウム・マグネシウムなどの水溶性イオン量、pH、BOD、DO・・・
- ・ 地下水中への溶存エア量
- ・ 地盤の粒度組成、透水係数
- ・ その他

などが考えられ、これらの調査結果をもとに長期目詰まりの発生程度を評価する。

しかし、現状ではこれらの要因と目詰まりの進行に関する関係が明らかになっておらず、調査結果から長期目詰まりの進行状況を評価することはできない。現段階では類似現場における目詰まり進行データを収集し、これをもとに長期目詰まりの進行を評価するという手段が現実的である。

今後の工法の普及を考えるうえでは、事前調査段階における関連データの収集と、供用期間中の目詰まり進行データの収集を行い、これらをデータベース化して調査結果から目詰まりの予測が可能なシステムが構築されることが望まれる。

2.5 周辺環境調査

地下水流動保全工法の採用の有無に関わらず、地下水に流動がある地域に線状構造物を築造する場合、周辺地域に及ぼす影響は大きく、また、その影響は長期間にわたって継続する。一次的な現象は水位上昇および水位低下であるが、その水位変化が誘因となり、時間の経過とともに二次的な現象が周辺の環境変化となって現れる。その影響程度を把握するには、周辺の環境を施工前～施工後にわたって調査・観測する必要があり、特に、施工後の調査、観測データは、将来に向けての環境基準の指標となるものである。

周辺環境に与える影響は、その対象によって下記の事象となって現れる。

【地盤】

沈下、液状化、塩水化、湿潤化、乾燥化、脆弱化

【地下水】

湧水の枯渇、汚染の拡大、水質の変化

【植生（農作物）】

根腐れ、立ち枯れ

【構造物】

不等沈下、ネガティブフリクションの発生、建物や地下構造物の浮き上がり、
配管や埋設管の損傷、地下室への漏水、井戸涸れ、井戸能力の低下、水質の悪化
舗装面などの陥没、減水に伴う設備の不良化

【環境】

酸欠、環境悪化

ここでは、調査する対象ごとに、地盤調査、植生調査、構造物調査に分け、その調査および試験手法を述べるとともに、可能なものについては評価・判断基準を例示する。

2.5.1 地盤調査

地下水の流動を阻害したことによる地盤への影響として、水位低下側では地盤沈下の発生や塩水化の拡大が懸念され、水位上昇側では液状化の対象範囲および可能性が増大する。また、環境悪化という観点で捉えると、水位低下側では湧水の枯渇、酸化に伴う水質の悪化と酸欠、地盤の乾燥化が考えられ、水位上昇側では苔・カビの発生、汚染物質の拡散、凍上帯の拡大に伴う地盤の脆弱化、練り返しやサクシヨンの消失による強度低下およびコラプス沈下(川上、1989、p55参照)が懸念される。

(1)地盤沈下

- 水位低下は遮水壁の下流側で起こり、それが原因で地盤沈下が発生する場合がある。
- 特に、下流側に軟弱な沖積層が分布する場合、注意を要する。

【解説】

- ・ 粘性土層の場合、圧密未了～正規圧密状態のものが影響を受けやすい。
- ・ 同じ軟弱層でも沈下量は砂質土層に比べて粘性土層の方が大きい。したがって、水位低下で発生する地盤沈下は粘性土層の圧密沈下で評価する。
- ・ 被圧帯水層の地下水位を低下させた場合も、その上方の粘土層は被圧帯水層との境界付近から収縮を始め、徐々に上方へと収縮が拡大され、地盤沈下となって現れる(地下水ハンドブック、1998)。
- ・ 検討の対象となる範囲は遮水壁の近傍に限られるが、水位低下量が大きい場合には検討の範囲も広くなる。ただし、圧密沈下は長期間にわたって継続するため、線状構造物築造後、直ぐに影響が現れるとは限らない。このため、影響の程度を把握するには長期的な観測が必要である。
- ・ 全国の地盤沈下の状況を図2.5.1、表2.5.1に示す(環境白書、1999)。年間2cm以上の沈下が認められた地域は計9平野で、そのうち最近の5年間で20cm以上沈下したのは、栃木関東平野(18)、新潟南魚沼(29)、福岡筑後・佐賀平野(58)の4平野である。
- ・ 地盤沈下に対する対策として、下記の3平野に「地盤沈下防止等対策要綱」が決定されている。同要綱では、地下水採取を抑制し、地下水保全を図る地域を指定している(地下水ハンドブック、1998)。

①濃尾平野地盤沈下防止等対策要綱：岐阜県、愛知県および三重県の一部地域対象。

昭和60年4月26日決定、平成7年9月5日一部改定、平成16年度見直し。

②筑後・佐賀平野地盤沈下防止等対策要綱：福岡県および佐賀県の一部地域対象。

昭和60年4月26日決定、平成7年9月5日一部改定、平成16年度見直し。

③関東平野北部地盤沈下防止等対策要綱：茨城県、栃木県、群馬県、埼玉県および千葉県の一部地域対象。平成3年11月29日決定、平成12年度目標。

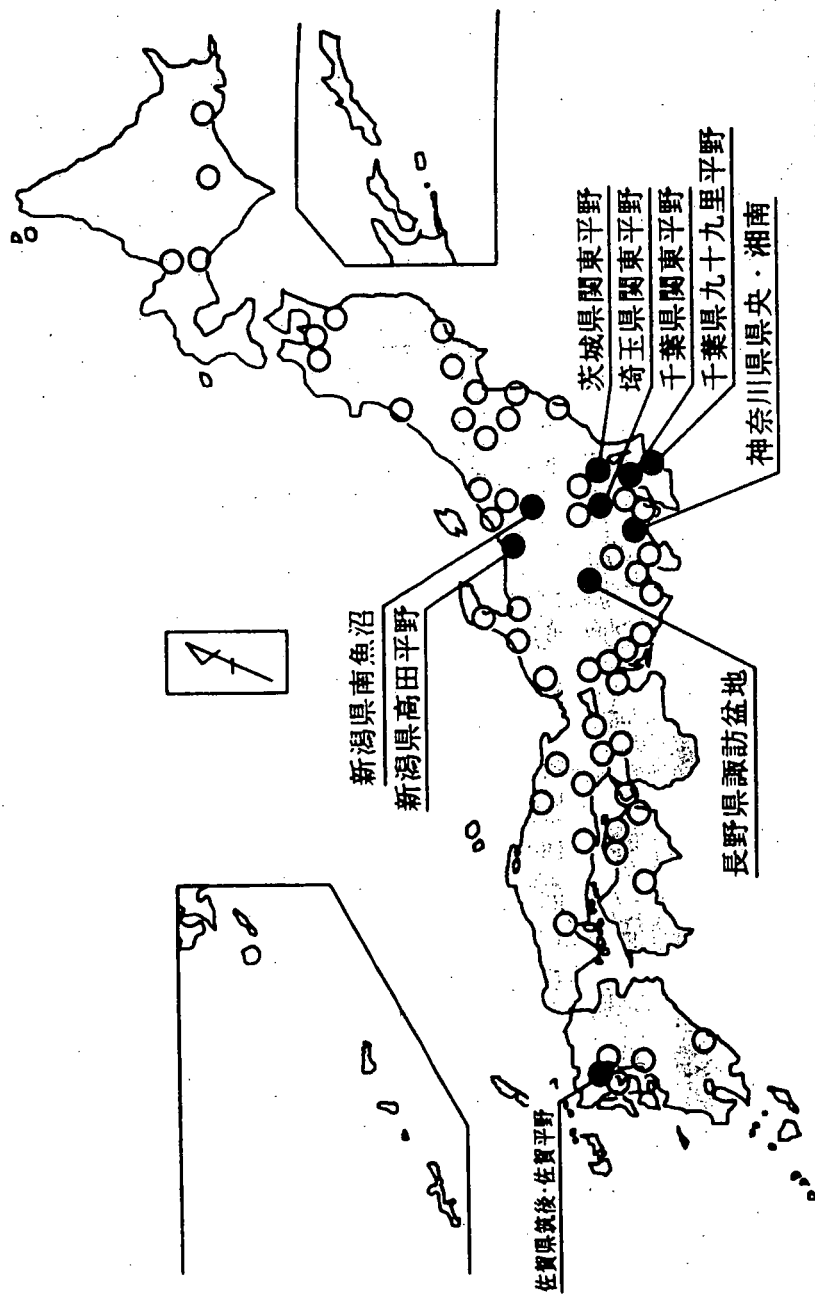
【調査・試験】

- 地盤沈下(圧密沈下) が懸念される場合、検討の対象となる沖積粘性土層の分布範囲などはボーリング調査で把握する。
- 圧密沈下量は、乱さない試料を用いて行った「土の段階載荷による圧密試験」(JIS A 1217 2000)もしくは「土の定ひずみ速度載荷による圧密試験」(JIS A 1227 2000)の結果を利用して算出する(以下、圧密試験)。
- 圧密試験に用いる乱さない試料は、固定ピストン式シンウォールサンプラーを用いて採取する。
- 採取本数は、粘性土層の層厚にもよるが層当り1～2本程度が適当と考える。
- なお、圧密試験の結果を整理するうえで、「土粒子の密度試験」(JIS A 1202 1999)が必要である。さらに、圧密試験結果を評価するうえで、下記の物理試験を実施することが望まれる。

{	土の含水比試験(JIS A 1203 1999)
	土の粒度試験(JIS A 1204 2000)
	土の液性限界・塑性限界試験(JIS A 1205 1999)
	土の湿潤密度試験(JIS A 1225 2000)
}	

【評価・基準】

- 沈下計算に必要な土の単位体積重量(湿潤密度)は日本道路公団設計要領第一集(1998)が参考になる。
- 数値解析で求めた沈下量と実際との整合は、長期観測で確かめることが望まれる。
- 水準測量による定点観測を行う場合、定点のメッシュは1 kmが適当である(建設省河川局、1993)。
- 不動点は堅固な地盤に設ける必要があるが、堅固な地盤を支持層とした杭基礎によって支持された構造物でも良い。
- 局所的な計測には沈下計、沈下板などによる集中管理も有効である。
- 許容沈下量の基準は各機関で異なるが、それらはまとめて後述する。
- 圧密沈下は、地下水位の低下途中から発生すると考えられることから、観測は構造物築造前から実施し、その後の頻度は、当初は短く、徐々に長く、最終的には半年～1年間隔が適当と考える。



- 平成9年度に年間2cm以上の沈下が認められた地域
- その他の地盤沈下地域

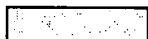
図 2.5.1 全国の地盤沈下状況図

[環境庁編：平成11年版環境白書総説より]

表2.5.1 地盤沈下地域

地図番号	都道府県	地域
1	北海道	石狩平野
2	"	釧路平野
3	"	十勝平野
4	"	夕張平野
5	青森	青森平野
6	"	津軽平野
7	"	八戸
8	宮城	気仙沼
9	"	古川
10	"	仙台・塩釜
11	秋田	象潟・金浦
12	山形	山形盆地
13	"	米沢盆地
14	福島	福島盆地
15	"	原町
16	"	いわき
17	茨城	関東平野
18	栃木	"
19	群馬	"
20	千葉	"
21	"	九十九里平野
22	埼玉	関東平野
23	東京	"
24	神奈川	"
25	"	県央・湘南
26	新潟	新潟平野
27	"	長岡
28	"	高田平野
29	"	南魚沼
30	"	柏崎
31	富山	富山・砺波平野
32	石川	七尾

地図番号	都道府県	地域
33	石川	金沢平野
34	福井	福井平野
35	山梨	甲府盆地
36	長野	諏訪盆地
37	静岡	沼津・三島
38	"	富士（岳南）
39	"	静岡・清水
40	愛知	豊橋平野
41	"	岡崎平野
42	"	濃尾平野
43	岐阜	"
44	三重	"
45	京都	京都盆地
46	大阪	大阪平野
47	兵庫	"
48	"	豊岡盆地
49	"	播磨平野
50	"	淡路島南部
51	鳥取	鳥取平野
52	岡山	岡山平野
53	広島	広島平野
54	徳島	徳島平野
55	香川	讃岐平野 （高松周辺）
56	"	讃岐平野 （坂出・丸亀周辺）
57	高知	高知平野
58	福岡	筑後・佐賀平野
59	佐賀	"
60	長崎	島原半島基部
61	熊本	熊本平野
62	宮崎	宮崎平野



年間2cm以上の沈下量が認められた地域

年間4cm以上の沈下量が認められた地域なし（昭和53年以降初めてゼロ）

(2) 液状化

- 水位上昇は遮水壁の上流側で起こり、その水位上昇が原因で地震時に地盤の液状化が発生する可能性がある。
- 特に、上流側に締めり具合の緩い沖積砂質土層が分布する場合、注意を要する。

【解説】

- 地震時における地盤の液状化については、その判定方法、計算に用いる水平震度（水平加速度）の値は機関によって異なる。
- 検討方法の詳細は各機関毎の専門書に記載されているが、対象となる地層は、地下水位以深で飽和状態にあり、締めり具合の緩い砂質土層が基本となる。
- 液状化によって起こる現象には下記のものがある。

噴砂、噴水、地盤の沈下と隆起、地盤の側方流動
構造物の浮き上がりや沈下、建物の転倒や倒壊
- 対象となる範囲は不圧地下水の水位が上昇した全域で、水位上昇の大きい遮水壁の近傍ほど新たに液状化検討を行う区間が増える。
- 液状化のしやすさは、微地形の影響を大きく受ける。若松(1992)は、微地形と液状化のしやすさを表2.5.2のようにまとめている。

表2.5.2 微地形ごとの液状化のしやすさ（若松、1992）

地 形 単 位		表層の液状化 被害可能性の 程 度	地 形 単 位		表層の液状化 被害可能性の 程 度
分 類	細 分 類		分 類	細 分 類	
谷底平野	扇状地型谷底平野	小	砂丘	砂丘	小
	デルタ型谷底平野	中		砂丘末端緩斜面	大
扇状地	扇状地	小	海浜	海浜	小
	緩扇状地	中		人工海浜	大
自然堤防	自然堤防	中	砂丘間低地・ 堤間低地		大
	自然堤防縁辺部	大			
後背低地		中	干拓地	干拓地	中
旧河道	古い旧河道	中～大	埋立地		大
	新しい旧河道	大	湧水地点(帯)		大
旧沼地		大	盛土地	砂丘と低地の境界付近の盛土地	大
湿地		中		崖・急斜面に隣接した盛土地	大
河原	砂礫質の河原	小		谷底平野上の盛土地	大
	砂泥質の河原	大		低湿地上の盛土地	大
デルタ(三角州)		中		干拓地上の盛土地	大
砂州	砂州	中		その他の盛土地	中
	砂礫州	小			

- 過去の液状化発生地点の分布については、地盤工学ハンドブック(1999)の資料編に詳しい。
- 広大なゼロメートル地帯(274km²、大東ら、1990)を有する濃尾平野では、濃尾地震(1891)、東南海地震(1944)、三河地震(1945)で液状化が発生している(土山ら、1988)。

【調査・試験】

- 砂地盤の液状化は水位上昇が直接の原因であるため、年間を通じて最も高い水位に対して検討する必要がある。このことは、工事による水位上昇のほか、季節的な変動をも考慮する必要性のあることを示唆しており、水位観測は長期的に行うことが望まれる。
- 季節的な影響も考慮するなら、1～2年の観測期間を設定することが望まれる。
- 液状化の簡易判定は、粒度試験結果に基づく方法が一般的である。なお、粒度試験の関連試験として、土粒子の密度試験がある。
- 粒度試験は、ボーリング調査の標準貫入試験時に採取した土試料を用いて行う。
- 標準貫入試験のピッチは1m毎が最も一般的であるが、状況に応じて0.5m毎に変更するなど臨機応変に対応する必要がある。
- 液状化の詳細判定を行う場合は、乱さない試料による繰返し三軸試験を行って液状化強度を求める方法もあるが、費用やサンプリング技術などの点で問題もある。
- ボーリング孔を利用した物理検層で地盤のS波速度を求めることも行われる。

【評価・基準】

- 判定に必要な土の単位体積重量(湿潤密度)は、日本道路公団設計要領第一集(1998)が参考になる。
- 液状化の判定方法は機関によって異なるが、その代表的な機関毎に判定方法が記載されている文献名を下記に示す。
 - ・「建築基礎構造設計指針」(社)日本建築学会
 - ・「道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編」(社)日本道路協会
 - ・「鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物・抗土圧構造物」運輸省鉄道局監修
 - ・「埋立地の液状化対策ハンドブック(改訂版)」運輸省港湾局監修
- 判定は抵抗率FL(安全率)や液状化指数(PL)、限界N値などで行う。
- 通常、 $FL < 1$ の場合、液状化が起こる可能性が高い。
- 広大な地域の液状化予測例として、東京都土木研究所(1987)が東京低地を500mメッシュに区切って検討している他、関西地盤情報活用協議会(1998)による兵庫県南部地域の液状化危険度予測がある。
- 液状化のメカニズム、地形と地質環境の影響などについては、地盤工学ハンドブック(1999)、足立他(1985)、土質工学会編(1993)が参考になる。

(3) 塩水化

- 水位低下は遮水壁の下流側で起こり、その水位低下が原因で地盤の塩水化が発生する場合がある。
- 特に海岸部に近接し、上部を透水性の高い粗粒土層が分布する場合、注意を要する。

【解説】

- ・ 検討の対象となる範囲は、水位が低下する全域となる。
- ・ 淡水の比重が1.0であるのに対し、海水(塩水)の比重は1.02～1.03であり、塩水は淡水の下部に位置している。
- ・ 塩水－淡水の境界を基準となる海水面よりの深さDで表すと、静力学的平衡条件下では、下図に示すように $D \approx 40 h_f$ となる(Ghyben-Herzberg の関係、土質基礎工学ライブラリー 19、1980)。

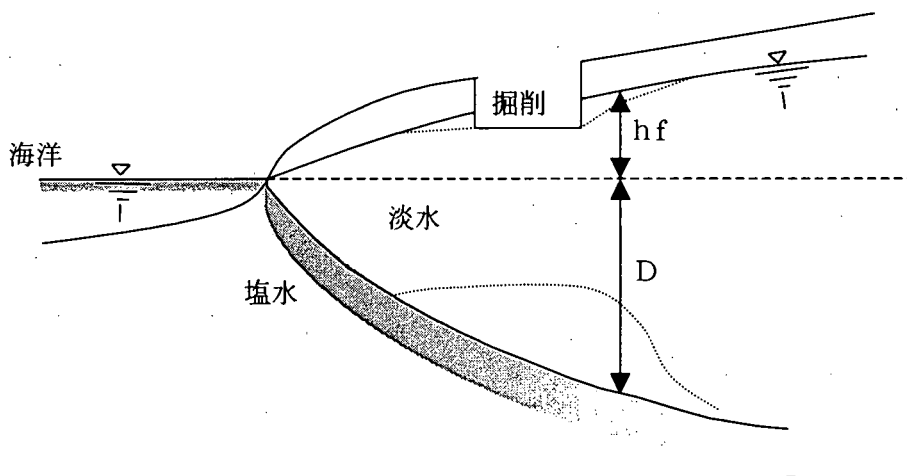


図2.5.2 塩水化の模式図

- ・ 地下水の流動や拡散を考慮した詳細検討には、山本の方法(1983) などがある。
- ・ 一旦、塩水化すると、塩素イオンが土粒子に吸着し、その後遺症が長期間残る。
- ・ 地下水の塩水化地域の状況を図2.5.3に示す(水資源白書、1998に加筆)。

【調査・試験】

- ・ 調査としては、ボーリング調査によって地下水の分布状況を把握する必要があり、井戸調査も有効である。また、地下水を採水し、その塩分濃度(塩素イオン濃度)を測定することも必要である。
- ・ 観測は、構造物築造前から実施し、築造後の頻度は、当初は短く、徐々に長く、最終

的には半年～1年程度が適当と考える。

【評価・基準】

- 塩素イオン濃度について、水道用水は水質基準で約200ppm(0.02%)以下であることが求められており、農業用水では約500ppm以上になると被害が発生しはじめるといわれている（地下水ハンドブック、1998）。
- 一方、稲は鈍感で1500～2000ppmまで耐えうる。逆に工業用水では10ppmの原水が1000ppmになれば施設の耐用年数に著しい違いが出るといわれている（新版 地下水調査法 1983）。
- 三橋他(1996)によると、樹木の塩分限界濃度は500ppm(0.05%)で、日本芝は1000ppmとされている。
- 山根(1972)は、塩素濃度10,000ppmで枯死に至った例を報告している。
- 一般に、作物の生育に害のある塩分濃度は400ppm以上とされている（造園植栽の設計と施工 1996）。

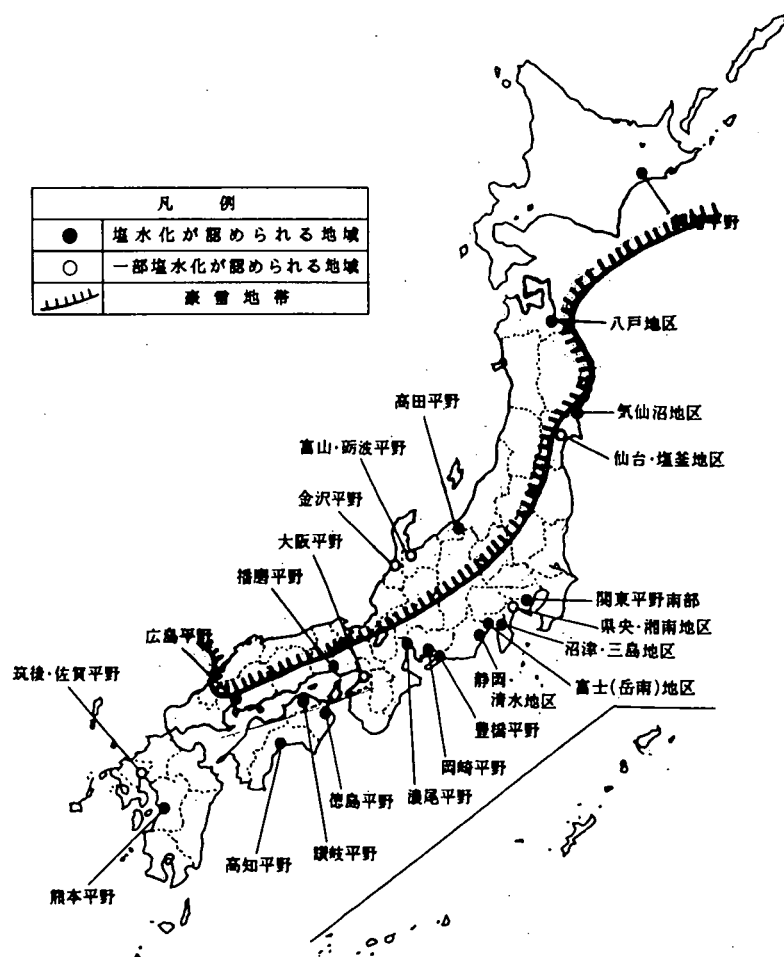


図2.5.3 地下水の塩水化地域の概況図

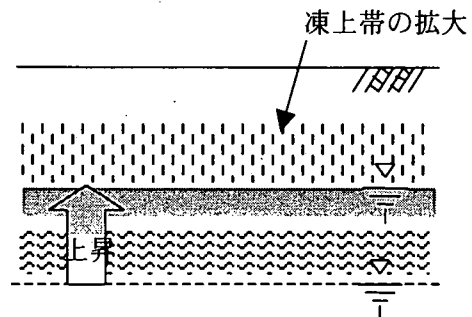
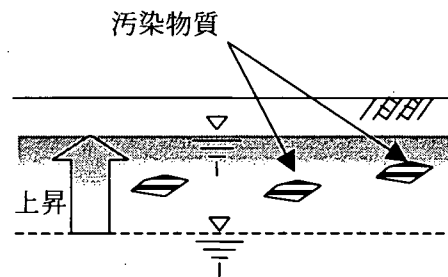
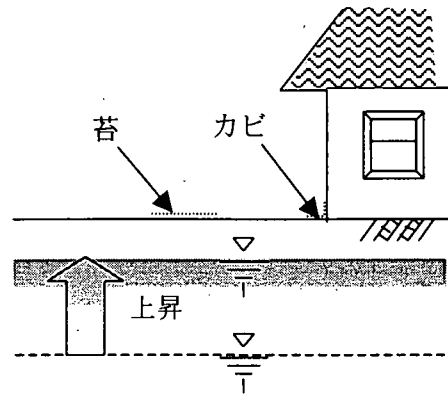
〔国土庁長官官房水資源部編：平成10年版水資源白書〕に加筆

(4) その他の環境悪化

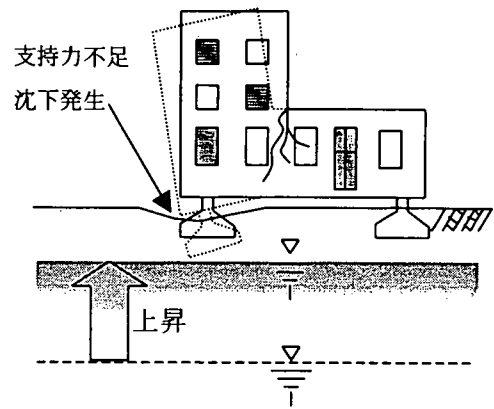
- 水位上昇側では、湿潤化が原因の苔・カビの発生、汚染物質の拡散、凍上帯の拡大とそれに伴う地盤の脆弱化、練り返しやサクシヨンの消失による強度低下およびコラプス沈下が考えられる。
- 水位低下側では、湧水の枯渇、酸化に伴う水質の悪化と酸欠、地盤の乾燥などが懸念される。

【解説】

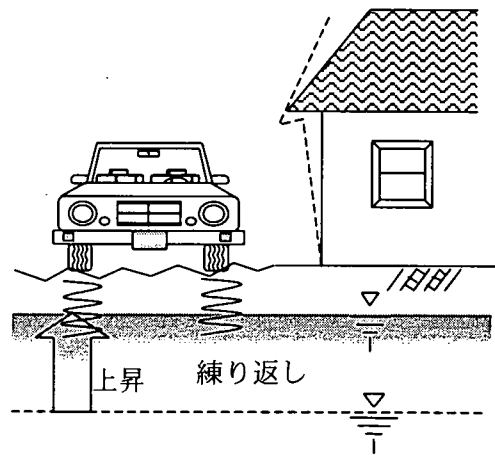
- 苔・カビの発生
 - ・ 水位上昇に伴う苔、カビの発生については毛管現象とも関係する。
 - ・ 苔、カビの発生と関わりの深い毛管現象については、山本(1983)、山口他(1989)が詳しい。
- 汚染物質の拡散
 - ・ 汚染物質の拡散、水質の悪化は、地下水の利用状況とも関わりが深い。
 - ・ 一度、汚染された地下水の再生には1400年かかるといわれている(水資源白書、1999)。
 - ・ 水位上昇に伴う汚染物質の拡散は、前川(1998)、環境白書(1999)、環境庁水質保全局(1999)が詳しい。
- 凍上帯の拡大
 - ・ 凍上帯の上昇は、地表面を隆起させ、舗装や構造物の被害となって現れる。
 - ・ 融解すれば地盤は脆弱化し、支持力不足につながる。
 - ・ 水位上昇に伴う凍上は毛管現象との関わりが深い。
 - ・ 凍上と関わりの深い毛管現象については、山本、山口他(前出)が詳しい。



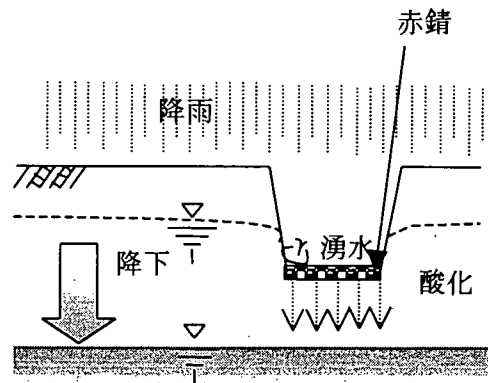
- ・ サクシヨンの消失による強度低下と沈下
- ・ 砂質土地盤では、水位上昇が地盤を飽和させ、それがサクシヨンの消失につながり、強度低下を引き起こすこともある。
- ・ 特に、盛土地盤で注意を要する。
- ・ サクシヨンの消失は、急激な地盤沈下となって現れることもある。
- ・ このような沈下はコラプス沈下というが(川上、1989)、水浸による沈下、水締めによる沈下とも呼ばれる。



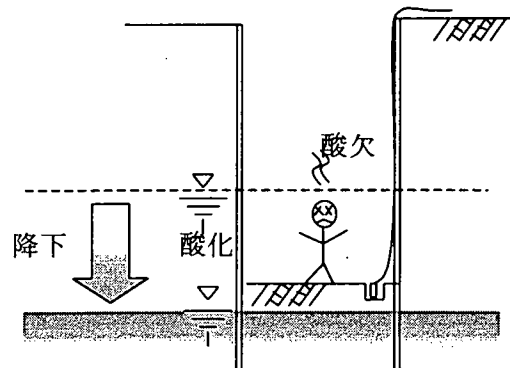
- ・ 繰り返しによる強度低下
- ・ 粘性土地盤では、水位上昇が含水比を増大させ、地盤を不安定化させる。そこに繰り返し荷重などの外力が作用した場合に、繰り返しによる強度低下を起こすこともある。



- ・ 水質の悪化
- ・ 水位低下に伴っては酸化反応が起こり、その後の季節的な水位変動や降雨により赤錆が流出し、それが地下水汚染につながる場合がある。
- ・ 赤錆は還元状態にある第1鉄イオン(Fe^{2+})が、酸素を多量に溶存する地下水に遭遇することで、水酸化第2鉄 $[\text{Fe}(\text{OH})_3; \text{Fe}^{3+}]$ が生成される(小林ら、1983)。
- ・ この水酸化第2鉄は溶解度が低く、沈殿性があり、赤錆となる。
- ・ 土中に硫化鉄(FeS_2)が存在すると第1鉄イオンが形成されやすい(地下水ハンドブック、1998)。



- 水位低下に伴う酸欠
 - ・ 酸化は酸素の消費を意味し、酸素濃度の低下に伴う酸欠が発生する場合もある。
 - ・ 酸化は、第1鉄イオン、硫黄イオンおよびそれらの化合物を主体とした還元性物質が原因。



【調査・試験】

- 環境悪化、特に、土壌、地下水に関する調査、試験については、環境庁水質保全局(1999)が詳しい。
- 強度低下の判断資料となる土の物理特性は、標準貫入試験時に採取した土試料で室内土質試験を行うことで把握する。

試験項目としては、下記のものが挙げられる。

〔土粒子の密度試験(JIS A 1202:1999)、土の含水比試験(JIS A 1203:1999)
土の粒度試験(JIS A 1204:2000)、土の液性限界・塑性限界試験(JIS A 1205:1999)〕

- 赤錆に対する調査は、ボーリングによって土壌を採取し、土壌中に Fe^{2+} がどの程度含まれるかを Eh （酸化還元電位）を求めて評価する（土質調査法、1990）。
- Eh の測定は、土試料に白金電極を挿入し、電位差計を用いて行う。
- ただし、事前に文献調査などで赤錆の発生しやすい地層が分布しているか否かを調べる。なお、水道用水の水質基準では、鉄の許容含有量は0.3ppmである。
- 酸欠に対する調査は、ボーリング孔を利用して酸素濃度を測定することで把握できる。予測は、土中に還元物質がどの程度含まれているか(JIS M 8213)で推定する。
- なお、酸素濃度は時間の経過とともに回復すると考えられる。

【評価・基準】

- 環境悪化、特に、土壌、地下水に関しての評価、基準については環境庁水質保全局(1999)が詳しい。
- 酸欠と人間の反応を表2.5.4に示す。

表2.5.4 酸欠と人間の反応（土質工学会ハンドブック、1982）

酸素濃度（％）	人間の反応
21	正常空気濃度
18	安全限界
16	頭痛、吐き気、呼吸や脈拍の増加
12	筋力低下、目眩、吐き気（死につながる）
10	顔面蒼白、意識不明、おう吐
8	昏睡、8分で死亡

2.5.2 植生調査

植生調査は、植生図を用いて現存する樹木を調査することから始める。評価方法には、環境庁(緑の国勢調査：1974)が示したものがあり、現存する植生が、植生自然度区分でいうどの程度の自然度かを事前に把握する。

表2.5.5 植生自然度区分表

自然度1.	市街地、造成地、植生のほとんど残存しない地区
自然度2.	畑地、水田などの耕作地、緑の多い住宅地
自然度3.	果樹園、桑畑、茶畑、苗穂などの樹園地
自然度4.	シダ群落などの背丈の低い草原
自然度5.	ササ群落、ススキ群落など背丈の高い草原
自然度6.	常緑針葉樹、落葉針葉樹、常緑広葉樹の植林地
自然度7.	クリーミズナラ群落、クヌギコナラ群集等、 一般には二次林と呼ばれる代償植生地区
自然度8.	ブナ・ミズナラ再生林、シイ・シホウガ林等、 代償植生であっても、特に自然植生に近い地区
自然度9.	エゾマツトドマツ群集、ブナ群集等 自然植生のうち多層の植物社会を形成する地区
自然度10.	高山杯で、風衝草原、自然草原等 自然植生のうち単層の植物社会を形成する地区

このうち、自然度2，自然度6，自然度7，自然度9で全体の83%を占める(環境白書、1999)。

一方、地下水の流動を阻害したことによる植生への影響として、水位の上昇に伴う湿潤化や水位低下に伴う塩水化が原因の根腐れが考えられる。また、大きな水位低下が発生した場合は樹木など立ち枯れが懸念され、地下水位の変化が原因の水質変化も植生に与える影響は大きい。

(1) 根腐れ

- 遮水壁の上流側では、発生する水位上昇が原因で地盤に湿潤化が起こり、それが植物の根腐れにつながる場合がある。
- 下流側では、発生する水位低下が原因で地下水の塩水化が起こり、それが植物の根腐れにつながる場合がある。

【解説】

- ・ 樹木が湿潤化や塩水化で根腐れするか否かは、その時の気候（季節、気温、降雨量など）、環境、土の状態、水位変化量にも左右される。
- ・ 乾燥に耐える樹木には下記のようなものがある。

表2.5.6 乾燥に耐える樹木など（三橋他、1996）

アカシア類、アカマツ、アケビ、アセビ、アベリア、イスノキ、イチョウ、イブキ、ウバメガシ、ウメ、エニシダ、オリーブ、カイズカイブキ、カシワ、カラマツ、クロマツ、コウヤマキ、コナラ、サクラ、シラカバ、ソテツ、ツルマサキ、トウヒ、ドイツトウヒ、トベラ、ドラセナ、ナンテン、ニセアカシア、ネズミサシ、ハイバクシン、ハンノキ、ヒイラギ、ヒサカキ、ボケ、マサキ、メギ、モミ、ヤシ類、ヤナギ類、ヤマナラシ、ユウカリ、ユッカ
--

- ・ 湿地を好み、潮害に弱い樹木には下記のようなものがある。

表2.5.7 湿地を好み、潮害に弱い樹木など（日本道路公団設計要領第一集、1998）

サルスベリ、シダレヤナギ、トウカエデ、ドウダンツツジ、ホウノキ、ヤマブキ

- ・ 乾燥地が適している樹木については、日本道路公団設計要領第一集(1998)も詳しい。
- ・ 水位の上昇に伴って水の停滞が起こると酸素の供給が止まり、それが原因でバクテリアが発生して水が腐り、樹木が枯れることがある。

【調査・試験】

- 湿潤化や塩水化が起こる可能性のある地域にこれら樹木が生育しているか否かは、事前に、聞き取り調査により把握しておく。

【評価・基準】

- 三橋他（1996）によると、地下水位がGL－1 m以深なら正常に生育するといわれている。
- ドイツでは、50cm以上の激しい水位変動は植物にダメージを与え、長期的には1 m以上変動させてはいけないとの報告がある。また、地下水面が下限深度を超えた場合、2年毎に元に戻す必要があるとしている(Dirk Nishen, 1996、INFO BOX)。
- コンクリート打設による土壌のアルカリ化は樹木の生育に大きく影響を及ぼし、土質基礎工学ライブラリー 20(1981)によるとpH 8以上で生育不良となり、pH9.5以上では枯死に至る場合があるとしている。

(2) 立ち枯れ

- 遮水壁の下流側で発生する水位低下が原因で、樹木の立ち枯れが起こる場合がある。

【解説】

- 乾燥の対象となる範囲は水位低下が起こる全域となるが、水位低下量の大きい遮水壁の近傍で特に注意する必要がある。
- 樹木が水位低下によって立ち枯れするか否かは、その時の気候（季節、気温、降雨量など）、環境、土の状態、水位変化量にも左右される。
- 湿地に耐える樹木には下記のようなものがある。

表2.5.8 湿地に耐える樹木など（三橋他、1996）

アオキ、アキニレ、アジサイ、アスナロ、イヌマキ、ウツギ、エノキ、オオデマリ、カクレミノ、カツラ、カラタチ、キョウチクトウ、ギョリュウ、クヌギ、クルミ類、コブシ、コウヨウザン、サイカチ、サザンカ、サルスベリ、サワシバ、サワラ、サンゴジュ、シキミ、シダレヤナギ、シモツケ、シラカバ、スギ、シイ、センダン、タイサンボク、ダンチク、ツルマサキ、ドウダンツツジ、トチノキ、トベラ、トネリコ、ドロノキ、ナンテン、ネズミモチ、ネムノキ、ノバラ、ハチク、ハンノキ、ヒメコブシ、フサザクラ、フジ、フヨウ、プラタナス、ホオノキ、ポプラ、マサキ、ミズキ、ムクゲ、ムクノキ、メダケ、メタセコイヤ、モッコク、モミ、ヤチダモ、ヤツデ、ヤナギ類、ヤマブキ、ユウカリ、ラカンマキ、ラクウショウ
--

- 湿地に適している樹木については、日本道路公団設計要領第一集(1998)が詳しい。
- 水位低下が原因で根の周辺（根圏、土質基礎工学ライブラリー 20、1981）で酸欠が発生した場合、根の吸水が停止し、樹木が立ち枯れすることがある。

【調査・試験】

- 水位低下が起こる可能性のある地域にこれら樹木が生育しているか否かは、事前に聞き取り調査で把握しておく。
- 酸欠の調査については、ボーリング孔を利用した酸素濃度測定で把握可能である。事前予測は、土中に還元物質がどの程度含まれているか(JIS M 8213)で推定できる。

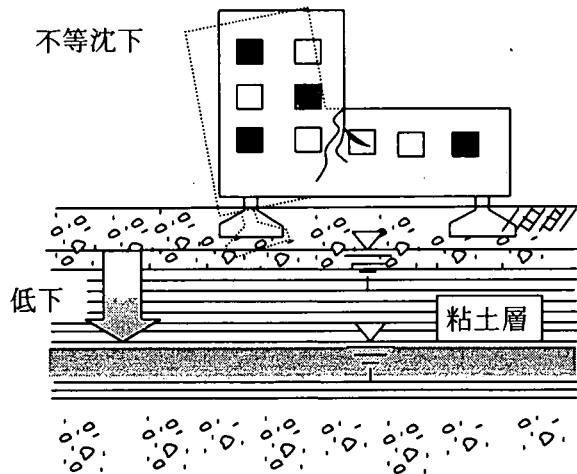
2.5.3 構造物調査

地下水の流動を阻害したことによる構造物への影響として、水位低下側では地盤沈下が原因の建物などの不等沈下や基礎杭に対するネガティブフリクションの発生が考えられ、それに伴って配管などの付帯設備に損傷を引き起こすこともある。また、周辺井戸に対しては水質の悪化や井戸能力の低下、井戸涸れが懸念され、減水に伴う水田への影響や農業施設の不良化も問題となる。さらに、水位低下による塩水化帯の上昇でコンクリート杭や鋼管杭の腐食も場合によっては問題となる。

一方、水位上昇側では、建物や地下構造物の浮き上がりとそれに伴う付帯設備の損傷や、地下室への漏水が起こる可能性があり、掘削工事現場では盤膨れやボイリングの発生が懸念される。また、コラプス沈下が原因となり、道路の舗装など地表面の陥没が発生する場合もある。

(1) 不等沈下

- 遮水壁の下流側で水位低下が原因の地盤沈下が発生した場合、それが建物などに有害な不等沈下につながることもある。
- また、埋設管などが沈下したことで、杭によって支持された建物との間の取り合い部が破損することもある。
- 不等沈下は、下流側に軟弱な沖積層が分布する場合、注意を要する。



【解説】

- ・ 圧密未了～正規圧密状態の粘性土層が分布する場合に影響が大きい。
- ・ 不等沈下は水位低下が原因で発生する圧密沈下量で評価する。
- ・ 圧密沈下量は、水位低下量の大きい遮水壁の近傍で大きく、遮水壁から離れるに従って徐々に減少する。したがって、築造する線状構造物と直交する方向に長辺をもつ構造物では、不等沈下の発生が懸念される。
- ・ 圧密沈下は長期間にわたって継続するため、線状構造物築造後、直ぐに影響が現れる

とは限らない。このため、影響の程度を把握するには長期的な観測が必要である。

【調査・試験】

- 調査は、軟弱な沖積層が分布する範囲に、線状構造物と直交する方向に長辺をもつ構造物が存在するが否かを中心に行う。
- 不等沈下の発生が懸念される場合、「2.5.1 地盤調査 (1) 地盤沈下」に準じて乱さない試料を採取し、圧密試験などを行う。
- 定点観測を長期的に行い、数値解析の結果をフォローすることも望まれる。

(2) ネガティブフリクション

- 遮水壁の下流側で水位低下に起因する地盤沈下が発生した場合、それが構造物を支持している杭にネガティブフリクション（負の摩擦）を発生させる。
- 特に、下流側に軟弱な沖積層が分布する場合、注意を要する。

【解説】

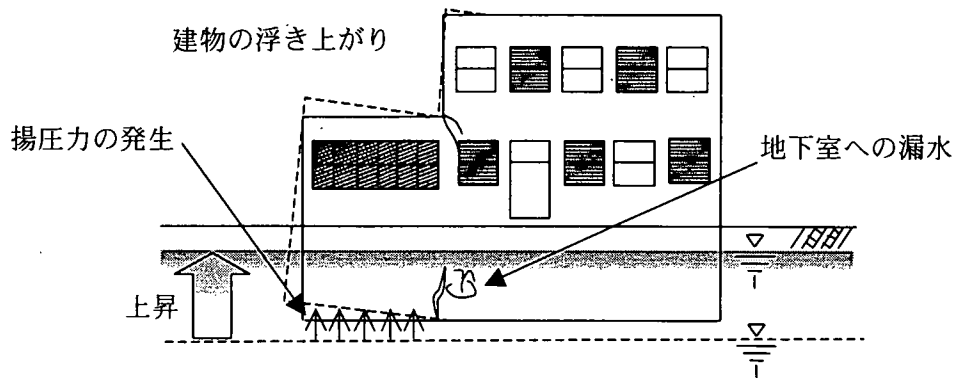
- ネガティブフリクションは、場合によっては杭の破損にもつながる。
- ネガティブフリクションは、水位低下が原因で有効上載圧が上昇し、圧密降伏応力を上回った場合に発生する。
- したがって、圧密未了～正規圧密状態の粘性土層が分布する場合に影響が大きい。
- ネガティブフリクションは、水位低下量の大きい遮水壁の近傍で発生する確率が高く、遮水壁から離れるに従って徐々に減少する。
- 検証の結果、増加する応力によって杭の断面の確保が困難な場合、アンダーピニングなどの対策を考える必要がある。

【調査・試験】

- 調査は、軟弱な沖積層が分布する範囲に、支持杭によって支持された構造物が存在するが否かを中心に行う。
- ネガティブフリクションの発生の有無は、「2.5.1 地盤調査 (1) 地盤沈下」に準じて乱さない試料を採取し、圧密試験などを行うことで検証する。

(3) 建物の浮き上がりおよび漏水

- 遮水壁の上流側で水位上昇が発生した場合、それが建物や地下構造物の底面に揚圧力として作用し、建物などを浮き上がらせることがある。
- 水位上昇は、地下室への漏水の原因となる場合もある。



【解説】

- 検討の対象となる範囲は、水位が上昇する全域となる。特に、水位上昇量の大きい遮水壁の近傍で影響が大きい。
- 大きな揚圧力は建物などを浮き上がらせるばかりでなく、傾かせたり、変形させたりする。特に、直接基礎のべた基礎を採用している建物などに大きな被害を及ぼすと考えられる。
- 建物や地下構造物の浮き上がりや変形は、配管などの付帯設備の損傷にもつながる。
- 浮き上がりの事例としては、東京の上野地下駅における対策(片寄ら、1996)や、最近では、東京駅の浮き上がりに対して地中アンカーを打設して対処中(2000年1月)である。

【調査・試験】

- 調査は、直接基礎を採用している建物を中心に、地下室の有無を調べる。
- 浮き上がりの可能性がある建物に対しては、数値解析による確認を行う。
- 漏水の可能性のある建物（地下室）がある場合は、事前に遮水処置を施すとともに、長期的なモニタリングを行う必要がある。

(4) 井戸涸れなど

- 遮水壁の下流側で水位低下が発生した場合、周辺井戸に井戸能力の低下や井戸涸れが起こることがある。
- 水位の上昇や降下が原因で、井戸水の水質が変わる（悪化）こともある。

【解説】

- ・ 井戸能力の低下や井戸涸れの検討対象となる範囲は水位が低下する全域となるが、遮水壁に近いほどその影響は大きい。
- ・ 井戸枯れなどは単なる井戸の破壊だけでなく、企業にとっては死活問題になることもある。このことは、井戸の補償問題だけではすまされないことを意味する。
- ・ 水位上昇に伴う汚染物質の拡散が原因の水質の悪化、水位低下に伴う水質の悪化も井戸に与える影響は大きい。
- ・ 水位上昇に伴う汚染物質の拡散は、前川(1998)、環境白書(1999)、環境庁水質保全局(1999)が詳しい。

【調査・試験】

- ・ 調査の方法は「2.4 本調査」の「2.4.3 周辺井戸調査」に準じる。
- ・ 井戸能力の低下や井戸涸れは、下流側で均等に発生するとは限らないので調査は広域的に行い、事後も継続して実施する。
- ・ 汚染物質の拡散を考えた場合、調査の対象は水位上昇側にも及ぶ。

【評価・基準】

- ・ 井戸涸れなどの評価は、事前調査の「2.4.3 周辺井戸調査」の密度に大きく左右される。
- ・ このことから、漏れのない事前調査を実施すべきである。

2.6 影響評価

2.6.1 影響評価の概要

影響評価では、線状構造物構築によって地盤沈下などの影響項目が、どの程度の影響(変動)を受け、環境問題が発生する可能性があるかを検討する。まず、構造物建設による直接的な現象項目(地下水位の変動など)への影響を定量的に評価し、現象項目と影響項目の関連性から影響項目への影響度を評価する。

【解説】

前節 2.5 で示したように、線状構造物構築による直接的な現象は、地下水流動阻害に関する地下水位変動などの現象項目である。影響項目は現象項目の変動を受けた二次的な影響といえる。

また、影響項目は多岐にわたり、その個々の項目について構造物構築の影響を評価することは、実務的に困難である。このため、ここでは現象項目と影響項目の定量的な関係を踏まえたうえで、現象項目の変動によって影響評価を行うこととする。

評価時に用いる基準値の設定については 2.6.2 および 4.4 で解説する。

(1) 現象項目と影響項目

線状構造物による流動阻害の影響は、現象項目と影響項目に分けて検討する。

現象項目は、構造物による流動阻害を直接的に表す現象であり、以下の 4 項目が挙げられる。

(a) 地下水位(頭)上昇

構造物を境に、自然地下水流上流側でみられるもので、地下ダム効果のダムアップと言われる現象である。

(b) 地下水位(頭)低下

自然地下水流の下流側でみられるもので、地下ダム効果のダムダウンと言われるものである。

(c) 周辺動水勾配減少

流動阻害を端的に表した現象で、地下水流動量の減少を表す。

(d) 水みち変化

構造物周辺の地盤の乱れにより地盤の難透水化や構造物周辺回りこみなどによって、本来の地下水流向が変化する現象である。

影響項目は、現象項目の変動に起因して生じる地下水流動以外の間接的な影響を指し、概して副次的なものである(井戸内水位低下などは揚水ポンプの揚程限界に直接関係するので現象項目であり同時に影響項目にもなりえる)。本来、影響評価では個々の影響項目に基準値を定めその予測値と比較するべきであるが、1 章や 2.5 節で示したように、影響項目は多岐にわたりこれらの影響項目と線状構造物建設の関係を直接評価することは多大な労力と高度な予測技術が必要となる。このことから、次項に示す簡略法を提案する。

(2) 影響評価の手順

影響評価の概略手順は図 2.6.1 に示すとおりである。

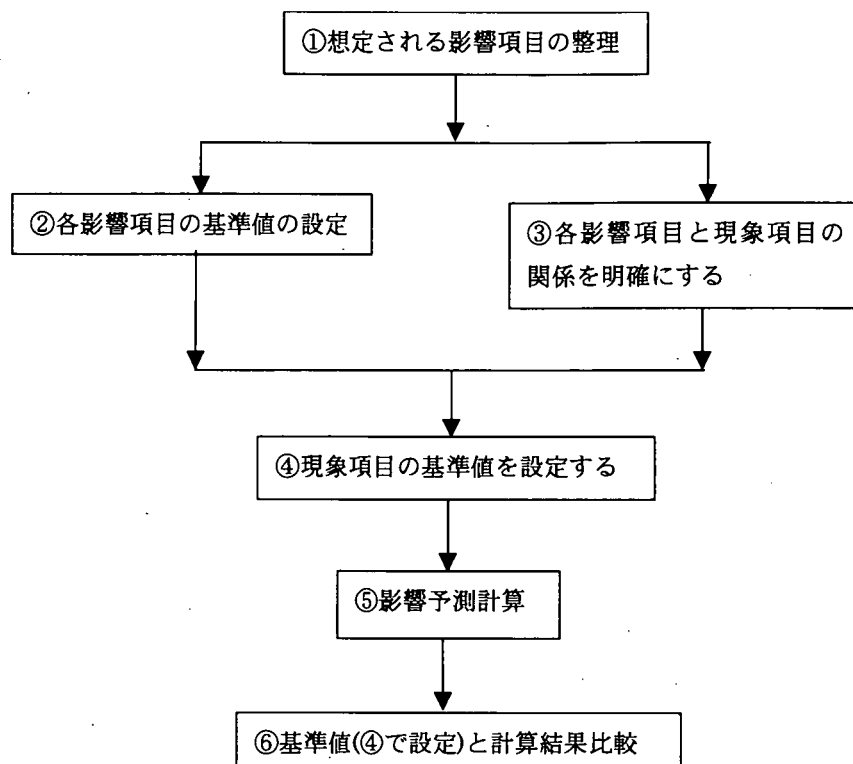


図 2.6.1 影響評価の概略手順

以下に各ステップの内容を示す。

①想定される影響項目の整理

これまで紹介してきた影響項目は全ての地盤に対して問題となることはなく、地盤条件、地下水・土地利用などの観点から、影響評価項目として検討すべき項目を選定する。

②各影響項目の基準値の設定

影響評価で用いる基準値を設定する。設定の詳細は次項で解説する。

③各影響項目と現象項目の関係の明確化

影響評価では、現象項目を直接の評価指標とするため、影響項目と現象項目の定量的な関係を明確にしておく。

④現象項目の基準値設定

③の関係をを用いてステップ②で設定した影響項目の基準値に対する現象項目の基準値を誘導する。ここで、影響項目が複数ある場合はこれに対する現象項目の基準値の中で最も厳しく(許容変動量が小さく)設定される値を評価基準として採用する。

⑤影響予測計算

ここでの計算は、現象項目の変動を求めることを目的としており、計算法は 2.6.3 および 2.6.4 で解説する。

⑥基準値(④で設定)と予測値の比較

基準値と予測値（計算結果）の比較を行い地下水流動阻害による影響発生の可能性を評価する。

このように、最終的な影響評価を現象項目の値を用いて行うことで、影響予測計算は地下水流動に関する変動に限定することができ、既存の計算法を用いた評価が可能になる。

2.6.2 評価基準設定の考え方

影響評価を行う段階で、以下の2つの評価基準を設定する。

表 2.6.1 影響評価で用いられる基準値

限界値(ε_0)	調査段階で設定される値で、法規制や社会的要因など種々の条件から、この値を超える状況は被害とみなされる限界の値
許容値(ε_1)	調査段階で設定される値で、調査精度の不確実性などを考慮して、限界値より厳しい条件として設定される値

影響評価では、現象項目に対し限界値よりさらに厳しい許容値を設定しこれを評価基準とする。

【解説】

(1) 基準値の設定

限界値は、土地や地下水の利用状況やこれらに関係する規制などから決定されるものである。条例などの法規制があれば、これに従って設定できる場合もあるが、規制がない場合には現地状況に応じた限界値を決定する必要がある。

許容値は、調査精度などを考慮して、限界値に安全率を考慮して設定するものである。現段階では安全率の具体的な値を提唱するには至っていない。また、これらの基準値は本来は影響項目に対して設定されるものであるが、評価の簡略化のために、現象項目の基準値に置き換えられるため、両項目間の関係が不明瞭な場合にも安全率の導入が必要である。

また、地下水挙動は季節や時刻の違い、降雨などの気象現象によって変動を受けている。影響項目はこのような自然環境下での現象項目の変動範囲内では抵抗できるものと考えてよく、構造物構築による変動がこの範囲内であれば影響項目が被害に転ずるほどの拡大をみせる可能性は極めて少ない。

さらに、現象項目および影響項目は構造物構築後、即座に変化を見せない場合もあることから、構築後の経時的な変動を考慮したうえで、最も影響が大きくなる時点での評価を行う必要がある。

(2) 現象項目の絞込み

本マニュアルでは評価基準として、以下の現象項目に着目する。

○ 水位(頭)変動量の限界値および許容値

○ 動水勾配変動量の限界値および許容値

水みちの変化については評価基準として取り扱わない。水位および動水勾配に対する基準値を満たすことにより、水みち変化に対する影響は評価できるものとする。一方、水みち変化によって水質変状が懸念される場合がある。しかし、水みち変化による水質変状については現状技術では評価し難い場合が多い。地下水質に依存した地下水利用などへの影響が問題となる場合には、基本的に水みちを大きく変化させない対策をとることとする。

2.6.3 影響評価のための計算法の概要

影響評価では、線状構造物による影響を定量的に予測する必要がある、地下水挙動を数学的に表現した評価モデルの導入が必要である。現地の状況に適した数学モデルを選定し、影響評価を行う。

【解説】

影響評価手法として、理論解や近似式による簡易計算法あるいは数値計算法などいくつかのモデルが提案されている。これらのモデルについて概説する。

(1) 評価モデル

影響評価のための計算では地下水系および構造物を数学的モデルで表す必要がある。ここでは、その基本的な事項についてまとめる。

(a) 浸透場次元

地下水流動阻害の問題では、構造物延長が数百 m～数 Km に及ぶ場合があり、検討対象範囲も広域地下水系を扱う必要がある。理想的には三次元場での検討が望ましいが、現在ではその計算労力は多大である。そこで、現地の状況によっては近似化し、より低次元場で簡単に扱える場合もあることから、浸透次元について整理しそれぞれの特徴を示す。

① 一次元

主たる遮断帯水層が旧河川のように比較的幅狭で、構造物がこの帯水層を完全に遮断する場合の地下水挙動には、地下水流動方向に対する一次元浸透場での検討が適用できる。

また、このような幅狭の帯水層でなくとも構造物延長が極めて長いことから、その延長中央横断面付近を取り出して一次元場で検討する場合もみられる。この考え方は掘削地に集まる地下水流量の計算でも用いられることがあるが、進士ら(1988)によって、その適用性に問題がある場合が指摘されている。

② 二次元断面

一次元場同様に帯水層は旧河川のように比較的幅狭で、構造物は帯水層を横断方向には完全に遮断しているが、深度方向には部分的にしか遮断していない場合に二次元断面場が適用できる。地下水流向は水平方向に加えて、構造物の上下を回り込む鉛直方向成分も評価できる。このモデルでも、構造物延長の中央断面付近を取り出して検討する場合もあるが、一次元場同様にその適用には問題が見られる場合がある。

③ 準三次元/二次元平面

前出①、②とは異なり帯水層は平面的な広がりを持ち、この平面場の一部に建設された構造物が帯水層を鉛直方向に完全遮断している場合に適用できる。このモデルでは鉛直方向の地下水の流れは考慮できない。したがって、複数の帯水層を考慮できる準三次元モデルでも、同一平面位置では各帯水層が持つ全水頭が同一であると仮定している。この点で、準三次元と二次元平面は同じ地下水流動状況を扱ったものである。また、準

三次元では不圧帯水層における自由地下水面高さによる透水量係数の変化が考慮できる特徴を有する。

④ 擬似三次元

平面的な広がりを持つ帯水層を扱う点では③準三次元/二次元平面場と同じである。しかし、地下水挙動は③の場合よりも、以下の点で三次元挙動に近い。

- ・ 帯水層間に介在する粘性土層内での鉛直方向の流れを取り扱う。
- ・ 帯水層内では平面二次元あるいは準三次元場の流れを扱う。
- ・ このため、大局的には三次元流れを扱うことができ、構造物延長方向の部分遮断状態が考慮できる。しかし、個々の帯水層中において鉛直方向の部分遮断状況は考慮できない。

⑤ 三次元

あらゆる地盤、構造物および対策工条件に対応できる汎用性に富んだ浸透次元である。しかし、計算モデルが大きくなる傾向があり、適用に当たっては計算機能力とのバランスを考慮する必要がある。

また、構造物近傍での地下水流の鉛直方向成分を考慮し、ある程度離れると二次元平面流とする流れ場のカップリングモデルも提案され、三次元モデルの構築が困難な場合の適用が期待できる(白石ら、1988)。

このように、三次元場の評価モデルを用いれば近似化の必要が無く、モデル設定の誤りを防ぐことができるので理想的といえる。しかし、遮断対象となる帯水層や構造物の関係によっては、計算労力が軽減できる低次元場の適用でも適切な影響評価計算が可能な場合があるので、必要精度、労力、経済性などを考慮して最適な次元場での評価計算を行うべきである。

(b)浸透挙動モデル

①被圧帯水層モデル

被圧帯水層においてはその上部を粘性土層などの難透水層に覆われており、帯水層中に地下水面が存在しない。このため、飽和状態の地下水流動のみを考慮すればよい。

被圧帯水層における地下水の流れは以下の浸透方程式にしたがう。

三次元挙動の基礎方程式

$$K_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.6.1)$$

ここで、 K_i : i 軸方向に沿った透水係数、 S_s : 比貯留係数、 h : 全水頭、 t : 時間
 x, y : 水平直行軸方向、 z : 鉛直軸方向

平面二次元挙動の基礎方程式

式(2.6.1)にディピューイの仮定を用いて鉛直方向は全水頭一定とし、次式とする。

$$T_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + T_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = S \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.6.2)$$

ここで、 T_i : 水平成分軸 i 方向に沿った透水量係数(= bK_i)、 S : 貯留係数(= bS_s)、
 b : 層厚さ

②不圧帯水層モデル

不圧帯水層においてはその上部を他の帯水層で境界づけられておらず、帯水層内に地下水面が存在する。自由水面を扱う問題となるため(自由水面上には移動可能な土中水分は無いと仮定)、式(2.6.2)の T および S を飽和部分の厚さ h (不透水基盤からの水位高さ) の関数として標記した以下の非線形方程式となる。

$$T_x(h) \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + T_y(h) \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = S(h) \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.6.3)$$

③飽和/不飽和浸透モデル

自由水面上の不飽和領域の存在を考慮し、不飽和領域内の流れも扱うモデルである。特に、降雨浸透時の地表面付近での不飽和浸透領域の水分変動を扱うことができるため、厳密に降雨涵養による影響が評価でき、さらに植生への影響を評価する場合にも有用である。

基礎方程式は以下で書き表される。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x(\varphi) \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y(\varphi) \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z(\varphi) \frac{\partial (\varphi + z)}{\partial z} \right) = (S_s + C(\varphi)) \frac{\partial \varphi}{\partial t} \quad (2.6.4)$$

ここで、透水係数 K および比水分容量 C は室内試験などからは体積含水率 θ の関数として得られる場合が多いが、 θ は圧力水頭 ψ と水分保持特性の関係をもつためこれを導入し、 K および C は ψ の関数系とした非線形方程式が用いられる。

(2) 数値計算法

数値計算法は現地の地層構成や水理境界条件などを比較的正確にモデル化でき任意の着目点での影響評価が行えるなどの利点をもつ。また、後に示す簡易計算では扱い難い非定常挙動(例えば、構造物構築後影響が見られるまでの経時的な挙動)や非線形挙動の計算も、数値計算では扱いやすい。このように、詳細な検討が行える半面、計算するまでの事前作業(データー作成など)が煩雑になることから、結果が出るまでにある程度の時間を必要とするなどの課題もみられる。

以下に、数値計算を地下水流動保全問題に適用する場合の注意点を挙げる。

尚、適用の詳細については 2.6.4(1)で紹介する。

(a) 広域地下水系に対応した簡素化の必要性

地下水流動阻害を評価する場合、対象とする地下水流動領域として構造物延長の数倍程度の領域を扱う必要があり、数 Km から数十 Km 半径を解析対象とする問題になる。この時、地盤や構造物を詳細にモデル化すると大容量なモデルとなり、ハード及びソフトそれぞれの限界から実務上計算できない場合がある。このため、前項(1)で述べた評価モデルの解説などを参考に、可能な限り次元場の簡素化を進め、実務レベルでの計算ができるように工夫する必要がある。

(b) 比較的長期にわたる評価

従来の建設工事における地下水挙動予測は工事期間中の検討に終わることが多い。しかし、地下水流動保全の問題では構造物の遮水性を持続する期間を対象とした数十年以上の長期間の評価が要求される。このため、自然状態で地下水や降雨などの変動を一年あるいは数年オーダーで平均化して扱える手法の採用が望ましい。

(3)簡易計算法

ここで、紹介する簡易計算法には、井戸理論など解析解による計算法と数値計算結果かの近似式による計算法がある。いずれの計算法もあらかじめ設定された水理境界など解析条件の下で誘導されている。このため、前出の数値計算法と比較すると、汎用性には欠けるが計算準備や計算時間が節約でき、概略検討に適した手法といえる。

個々の計算法は後述するが(2.6.4 参照)、適用に際してはいずれの簡易計算法においても以下の点に注意を要する。

(a) 前提条件の確認

簡易計算法は、簡単な公式・近似式やノモグラムを用いることから、その適用は簡便である。反面、これらの計算法を誘導する過程で導入された水理条件などが確認されないままに用いられることも少なくない。適用にあたっては、現地の条件と計算法の条件との違いについて、十分な検討が必要である。

(b) 評価地点の確認

数値計算では、影響評価地点は任意に選ぶことができるが、簡易計算では評価地点を遮水壁際などに限定して誘導している場合もあり、評価地点の位置の確認が必要である。

(c) 数値計算との使い分け

数値計算は簡易計算と比較して信頼性が高いものとして認知されているが、検討に要する期間と費用の問題から容易に実施できない場合もある。簡易計算により概略検討を行い数値計算の必要性を見極めた上で、数値計算による検討を行うという手順が有効である。

2.6.4 計算法

計算法としては、数値計算法の他に理論解や近似式に基づく簡易計算法が提案されている。それぞれの特徴を理解し、現場状況に応じた手法を適用する。

- (1) 数値計算
- (2) 簡易計算(1)：根入れ回り込みモデルの流用
- (3) 簡易計算(2)：連続井戸モデル
- (4) 簡易計算(3)：数値実験に基づく提案式(平面場の部分遮断)
- (5) 簡易計算(4)：数値実験に基づく提案式(断面場の部分遮断)

【解説】

(1) 数値計算

広域地下水解析となる地下水流動阻害問題では、三次元場での検討よりも、平面二次元や準三次元場での検討が現実的であり、準三次元解析による広域地下水解析が実施例も多い。ここでは、数値計算法の一例として準三次元解析プログラム(西垣ら、1998)の適用を紹介する。

この手法の特徴として以下が挙げられる。

- ① (2.6.3)式を支配方程式として有限要素法によりモデル化された、被圧/不圧帯水層を扱う。対象領域は平面二次元場を基本とし、深度方向の地層構成および地下水位高さによる浸透特性の変化を、透水量係数および貯留係数について与えることができる(図2.6.2)。

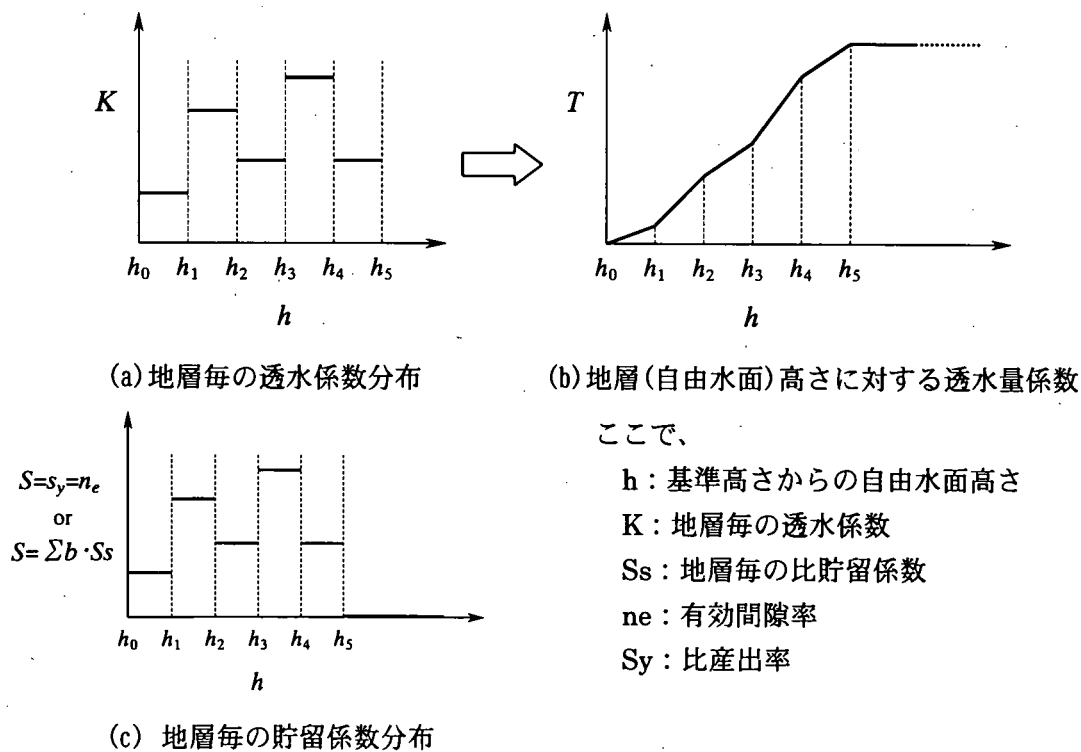


図 2.6.2 準三次元場における自由水面高さと浸透特性のモデル化

- ② 定常及び非定常状態の検討ができる。
- ③ 地表面高さおよび透水層毎の地層厚さを考慮するので、平面二次元流を扱うが地層および地形の傾斜などのモデル化が可能である(図 2.6.2 参照)。
- ④ 降雨による涵養や地表面からの漏水(湧水)を扱うことができる。
- ⑤ 鉛直方向の流れは扱うことができないため、構造物が帯水層を深度方向に完全に遮断していない場合には工夫が必要である(進士ら、1992)。
- ⑥ 多層地盤を扱うことはできるが、各層とも同一の水頭を有すると仮定することから、帯水層毎の水頭分布が異なるような連続性に富んだ不透水層あるいは難透水層が介在する地盤条件では適用し難い。

実際にモデル化する場合、長大線状構造物による影響評価のための広域地下水挙動の問題では以下の点に注意が必要である。

⑦ 解析領域の設定

明瞭な水理境界が確認されず、広い範囲にわたって一様な流れが見られる場合には、流れ横断方向の解析領域幅を決定することが困難である。ここでの境界条件は、図 2.6.3 に示すように不透水性で良いと考えられるが、構造物軸方向との離隔によって解析結果が左右される。

構造物延長の 3 倍以上の離隔を用いれば、影響が回避できると推定できる。

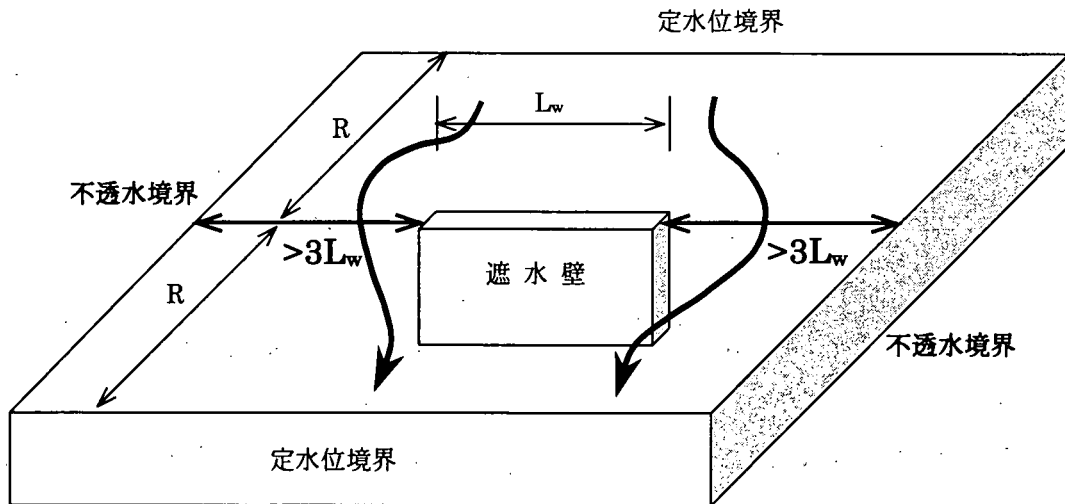


図 2.6.3 解析領域の設定例

以下に、土橋ら(1999)の計算事例を紹介する。

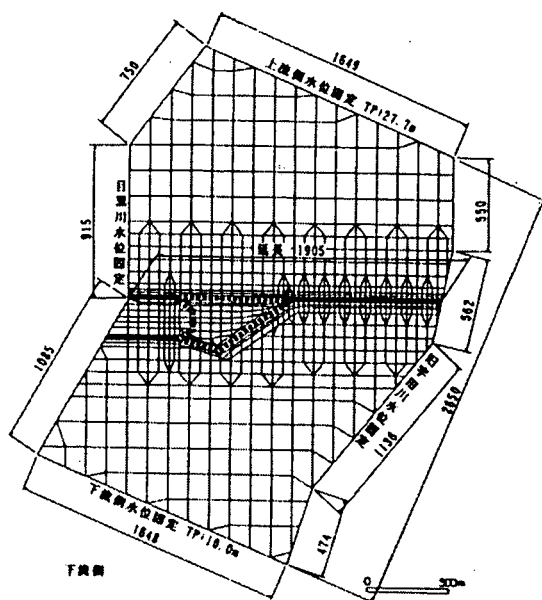
この現場では、二つの河川に挟まれた領域が対象であり、自然地下水は両河川流向に沿って流れ、これを遮る方向に線状地下構造物が建設される。解析領域周辺は、河川水位や自然水位で固定条件を与えている。図 2.6.4(a)～(d)に計算結果を示す。

同図(a)は、解析モデルを説明したものであり、対象領域内の構造物延長は約 2Km である。図には示されていないが、現地の遮断対象帯水層は複数あるが、主たる通水層である砂礫層のみを検討対象層とした。

図(b)は、現況解析結果を示している。ここでは、構造物上流側では T.P.+23m、下流側では T.P.+17m の地下水位分布の変化に着目する(同図中太線コンター)。

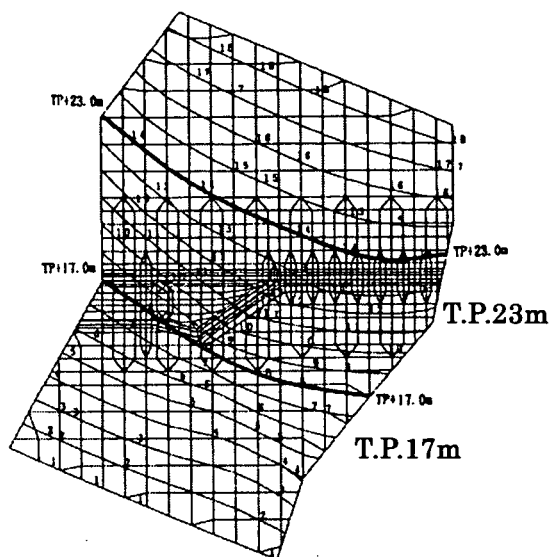
図(c)は、構造物全延長を遮断した場合の影響を示したものである。現況水位からの変動量は、構造物上流側で最大 1.2m 上昇、下流側で最大 4.3m 低下となり、構造物を境に 6.3m もの水位差を示すこととなった。

図(d)は、この対策として 400m 区間に通水工法を行った場合の効果予測結果を示したものである。水位変動は無対策時の 70%にまで軽減され、図(b)と比較しても、ほぼ現況地下水位に復元することが分かる。



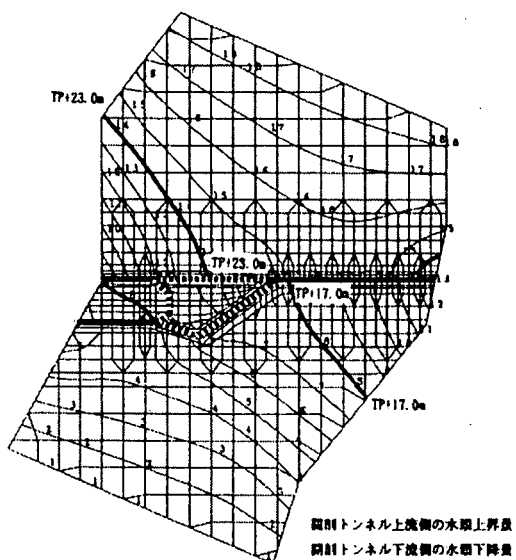
全体の水勾配 1:1/150

(a)解析モデル



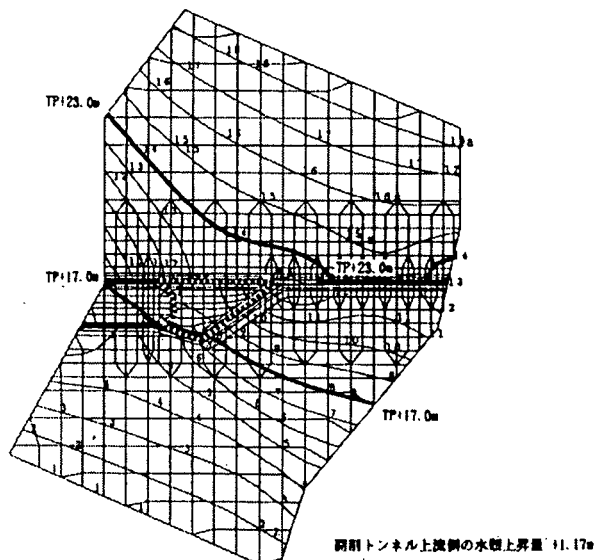
水頭コンター図

(b)現況解析結果



水頭コンター図

(c)無対策時の結果



水頭コンター図

(d)対策範囲 400m の結果

図 2.6.4 数値計算法による検討事例

(2) 簡易計算(1)：根入れ回り込みモデルの流用

不透水性構造物底面に作用する揚圧力と遮水性根入れ(ウォーターカーテン)長さの関係を、地下水流動阻害の評価に流用したものである(進士ら、1999)。

図 2.6.5(a)に示したのは、二次元平面場における流動阻害の概要である。上下流の定水位境界の水位差によって地下水流が発生する。地下水流を横断する方向(側方)には、無限の広がり仮定したモデルである。

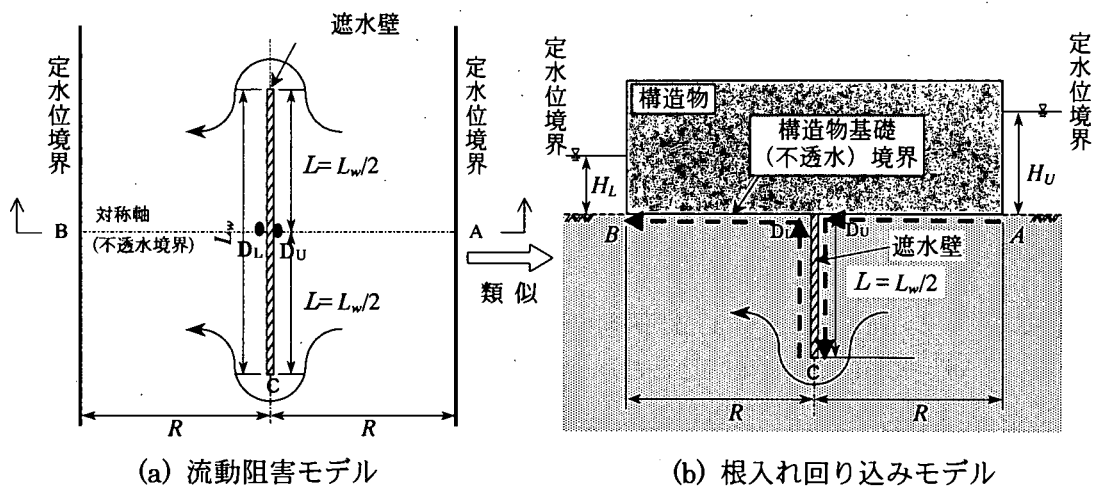


図 2.6.5 根入れ回り込みモデル相当による影響検討

(a)で示した地下水流動方向の線分 AB は構造物延長の中央部を通る対称軸とみなせる。この対称軸は不透水境界と考えることができるので、(b)のように地盤上に不透水構造物が乗った断面モデルとみなすことができる。ここで、(b)は非常に深い(深度方向に無限の広がり)を有する透水層上端に不透水構造物が乗ったものであり、(a)とは上下流の定水位境界の形状が異なる。すなわち、(a)は地下水流向に直交する境界、(b)は地下水流向に沿った境界をそれぞれの定水位境界として与えている。この違いは、構造物と境界までの距離が十分大きい場合には影響しないものと考えられる。

(b)のモデルは水理学のテキスト(例えば椿ら、1961)に紹介されており、以下の手法で計算できる。

想定する地下水流は構造物中央断面を迂回する $A \rightarrow D_U \rightarrow C \rightarrow D_L \rightarrow B$ であり、(b)中の破線経路である。ここで、この区間の両端には H_U, H_L の境界水位が設定され、破線部分の水位は、経路長に対して線形分布すると考える。これを数式で表すと次式のようなになる。

$$h = H_L + 2\Delta H \left(1 - \frac{x^*}{L_w + 2R} \right) : \text{被圧帯水層} \dots\dots\dots(2.6.5)$$

$$h^2 = H_L^2 + (H_U^2 - H_L^2) \left(1 - \frac{x^*}{L_w + 2R} \right) : \text{不圧帯水層} \dots\dots\dots(2.6.6)$$

x^* : 上流境界端部 A 点から下流境界端部 B 点へ向かう破線区間上の経路長
 $2\Delta H = H_U - H_L$

この計算法で、構造物中央の上下流両側(図 2.6.5 中の D_U, D_L 地点)の水頭が評価できる。

計算例を紹介する。

被圧帯水層で、 $R=1000\text{m}$ 、 $L_w=500\text{m}$ 、 $H_L=30\text{m}$ 、 $H_L=10\text{m}$ とする(自然動水勾配 $I_o=0.01$)。

よって、 $2\Delta H=30-10=20\text{m}$ 、 $x^*(\text{上流側 } D_U)=1000\text{m}$ 、 $x^*(\text{下流側 } D_L)=500+1000=1500\text{m}$

自然時の上下流側水位(構造物幅は 0 とした)= 20m

上流側水頭 $h_U=10+20 \times (1 - 1000 \div (500+2 \times 1000))=22\text{m}$ 、

よって自然時から 2m の水頭上昇

下流側水頭 $h_L=10+20 \times (1 - 1500 \div (500+2 \times 1000))=18\text{m}$

よって自然時から 2m の水頭低下

(3) 簡易計算(2)：連続井戸モデル

図 2.6.6(a)に示す検討領域を、遮水壁(構造物)を境に上流側、下流側に分ける。ここでは(b)に示す上流側領域についてのみ検討する。

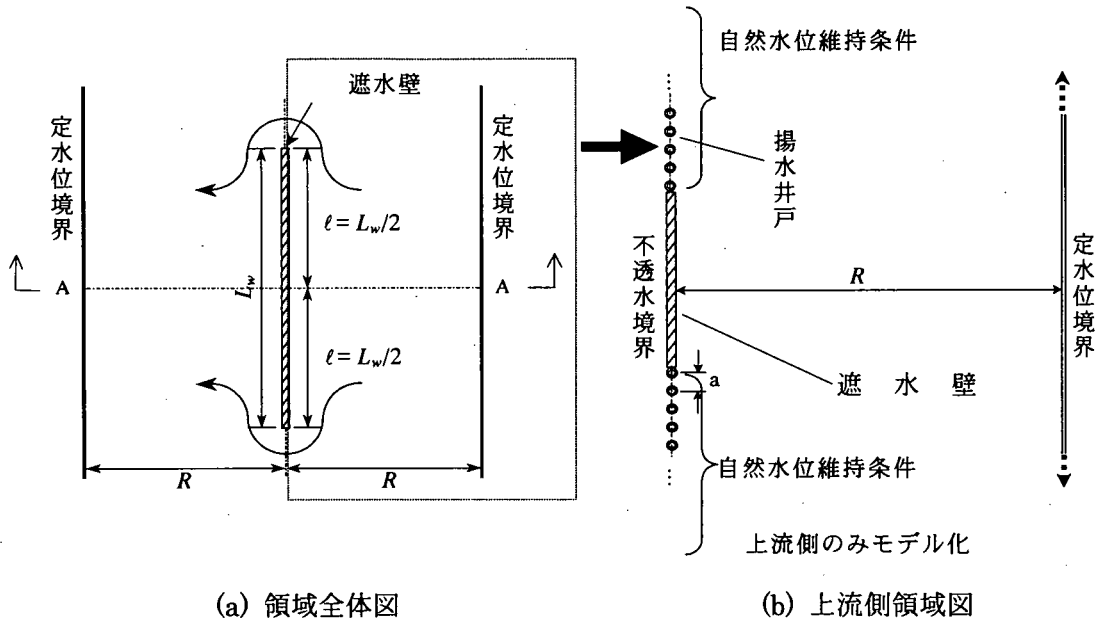


図 2.6.6 虚井戸・群井戸簡易予測モデル

ここで、上流側定水位境界と無限延長の構造物を考える。つまり、不透水境界と定水位境界の間に揚水井戸が存在する状況である。このようなモデルは、図 2.6.7 に示す虚井戸理論の複合的な適用になる。

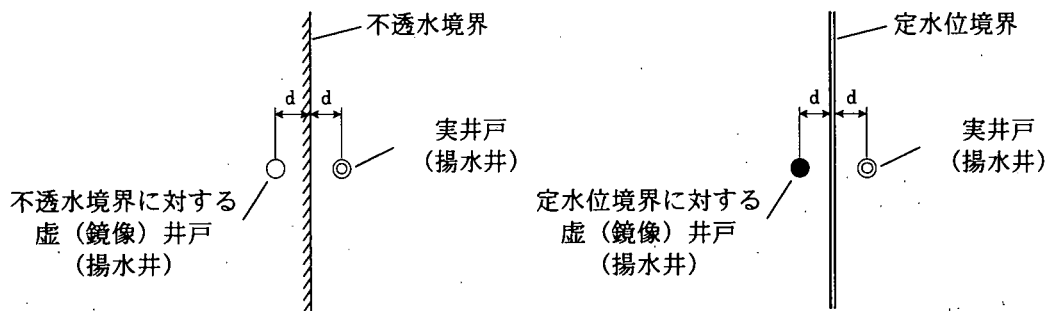
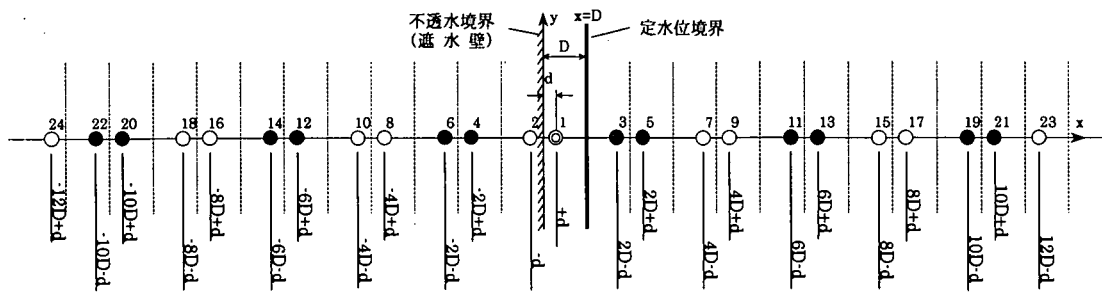


図 2.6.7 単一境界に対する虚(鏡像)井戸

すなわち、図 2.6.8 に示す無限個の井戸群になる。



[◎:実井戸 ○:虚井戸 (揚水井) ●:虚井戸 (注水井)]

図 2.6.8 実井戸及び虚井戸の配置

図 2.6.8 では実井戸は井戸番号 1 番のただけであり、この井戸によって両境界間の帯水層における水位低下量(定水位境界水位からの低下を指す)は(2.6.8)式で表される。この式は虚井戸に対する無限級数和を示すが、井戸番号が大きくなるに従い水位低下量 s は収束する傾向を示し、適切な収束基準値を導入すればよい。

$n = 1$ のとき

$n \geq 2$ のとき

$$x_1 = x_w = +d, \quad \begin{cases} x_n = x_{n-1} + (n-1)D (n: \text{奇数}) \\ x_n = -x_{n-1} (n: \text{偶数}) \end{cases} \quad (2.6.7)$$

$$s(x, y) = \frac{Q}{2\pi T} \left(\sum_{n=1}^{\infty} (\ln r_{n(\text{injection})}) - \sum_{n=1}^{\infty} (\ln r_{n(\text{pumping})}) \right) \quad (2.6.8)$$

ここで、 (x, y) : 評価点の座標、 r : 各種井戸と評価点間距離、 Q : 各井戸での揚水流量、

T : 透水量係数、

s : 水位低下量を表し、上流側定水位境界の水位からの低下を示す。

さらに、実井戸は自然水位状態を表現するために、構造物の無い領域に孔内水位一定条件を与えた仮想の井戸を密に配置する。一方、上式においては定流量揚水条件を与えるため、井戸干渉を考慮する必要がある。

上記の理論展開に則して計算すればよいが、多数の井戸数に対する検討が必要であり、手計算の範疇ではないことから、計算プログラムがコーディングされている(進士ら、1999)。

この方法による計算例を以下に示す。計算モデルは前項の計算例と同じモデルである。
被圧帯水層で、 $R=1000\text{m}$ 、 $L_w=500\text{m}$ 、 $H_L=30\text{m}$ 、 $H_L=10\text{m}$ とする(自然動水勾配 $I_0=0.01$)。

ここで、上流側定水位境界と構造物位置の初期水位との差は $\Delta H_0=(30-10)/2=10\text{m}$ である。

図 2.6.9 に図 2.6.6(b)の遮水壁中央断面の上半分の領域(全体領域の四分の一の領域)における水位上昇量コンターを示した。

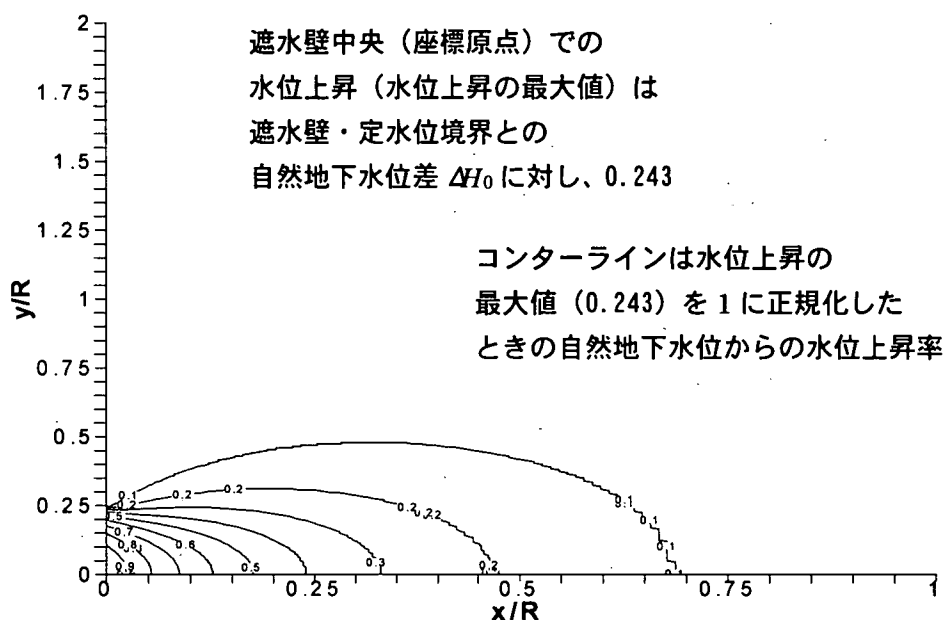
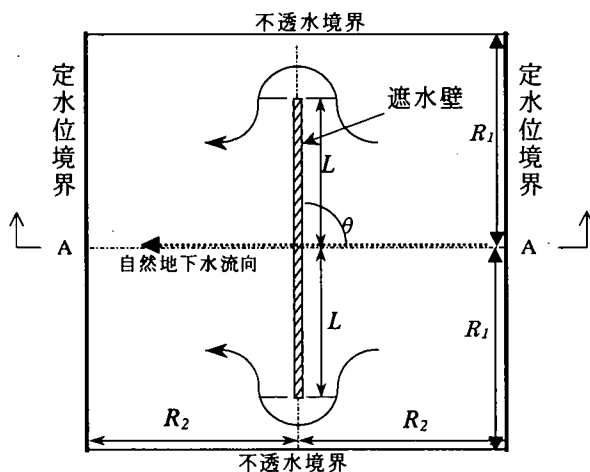


図 2.6.9 井戸モデルによる影響評価事例

壁中央部では、 $0.243 \Delta H_0$ の水位上昇量が見られる結果となり、 2.4m の水位上昇量となる。

二次元平面場における数値計算によるケーススタディーの結果から、構造物延長中央部の水位変動量 s_c が計算できる以下の近似式が提案されている(高坂, 1999)。前出の二つの簡易計算モデルとは異なり、図 2.6.10 に示すように領域は有限で、地下水流に平行な不透水境界が導入されている。



構造物延長中央部での水位変動量 s_c は次式である。

$$s_c = I(L \sin \theta) \left\{ A \frac{(L \sin \theta)}{R_1} \ln \left(\frac{R_2}{R_1} \right) + B \right\} \quad (2.6.9)$$

また、 A : 定数 ($A=0.4$)、 B : 定数 ($B=0.83$) であり、数値実験結果より経験的に定められたものである。

$$s_c = I(L \cdot \sin \theta) \quad (2.6.10)$$

式中の $(L \sin \theta)$ は、構造物半長の自然地下水流直交断面への投影長であり、この考え方は他の簡易モデルでも適用可能である。

前例と同様の計算例を紹介す。

被圧帯水層で、 $R_1=4000\text{m}$ 、 $R_2=1000\text{m}$ $L_w=500\text{m}$ (半長 $L=250\text{m}$)、
自然動水勾配 $I=0.01$ ($H_L=30\text{m}$, $H_L=10\text{m}$)、 $\theta=90^\circ$ とする。

上流側水頭上昇

$$s_c = 0.01 \times (250 \times \sin(90^\circ)) \times [0.4 \times 250 \div 4000 \times \ln(1000/4000) + 0.83]$$

$$= 1.98\text{m} \quad \text{式(2.6.9)による計算}$$

$$s_c = 0.01 \times (250 \times \sin(90^\circ))$$

$$= 2.5\text{m} \quad \text{式(2.6.10)による計算}$$

(5) 簡易計算(4)：数値実験に基づく提案式(断面場の部分遮断)

これまでの影響評価モデルはいずれも遮断対象となる帯水層は層厚方向に完全遮断されたものであった。大東らは(1996)、平面場では地下水流れを完全に遮断するものの、深さ方向には不完全遮断の場合の影響を三次元解析(地下水流向と構造物が任意角度で交差する場合を検討するため)で評価した。

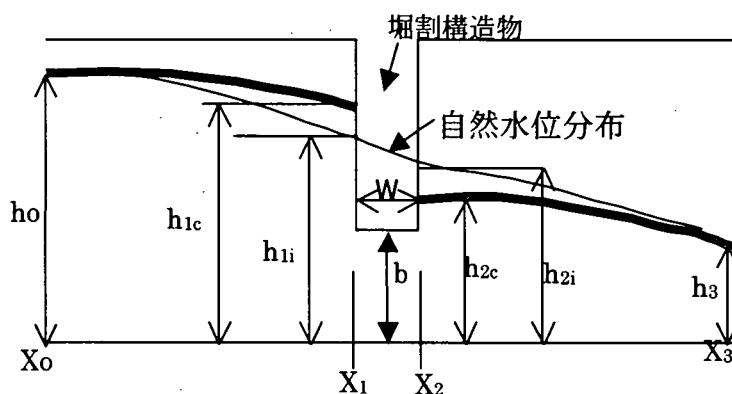


図 2.6.11 不完全根入れモデル(不圧帯水層)

地下水位勾配変動係数 α を以下の定義で設定している。

$$\alpha = I_{12c} / I_{12i} \quad (2.6.12a)$$

ここで、 I_{12} ：遮断部の上下地下水流動水勾配、
添字 i：初期状態、c：遮水壁構築後

$$I_{12i} = (h_{1i} - h_{2i}) / W \quad (2.6.12b)$$

$$I_{12c} = (h_{1c} - h_{2c}) / W \quad (2.6.12c)$$

W は遮断部の幅である。

また、帯水層残存率 β は自然水位高さに対する残存率であり、次式で定義されている。

$$\beta = \frac{2b}{h_{1i} + h_{2i}} \quad (2.6.13)$$

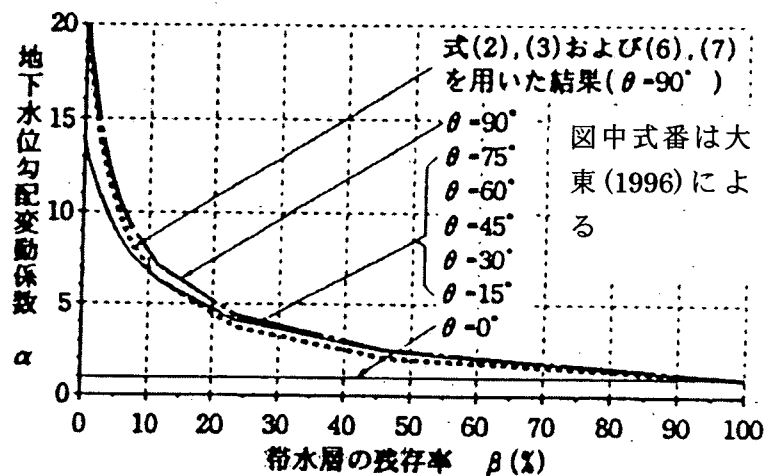
図 2.6.12 に検討結果を示す。ここで、 θ は自然地下水流向と構造物のなす角度である。また、図中には $\theta = 90^\circ$ の場合の以下の理論解から得られた結果も併せて示されている。まず、 h_{1c} は以下の 4 次方程式を解いて得られる。

$$\begin{aligned} & \left(\frac{x_2 - x_1}{2b(x_1 - x_0)} \right)^2 h_{1c}^4 + 2 \left(\frac{x_2 - x_1}{2b(x_1 - x_0)} \right) h_{1c}^3 + 2 \left(1 - \left(\frac{x_2 - x_1}{2b(x_1 - x_0)} \right) \left(h_0^2 + \frac{N}{k} (x_1 - x_0)^2 \right) \right) h_{1c}^2 \\ & - 2 \left(\frac{x_2 - x_1}{2b(x_1 - x_0)} \right) \left(h_0^2 + \frac{N}{k} (x_1 - x_0)^2 \right) h_{1c} + \left(\frac{x_2 - x_1}{2b(x_1 - x_0)} \right)^2 \left(h_0^2 + \frac{N}{k} (x_1 - x_0)^2 \right)^2 \\ & - h_0^2 - h_3^2 - \frac{N}{k} \left((x_1 - x_0)^2 + (x_3 - x_2)^2 \right) = 0 \end{aligned}$$

(2.6.14a)

ここで、N:降雨浸透量
 h_{2c} は以下の関係式から得られる。

$$h_{2c} = h_{1c} + \frac{x_2 - x_1}{2b(x_1 - x_0)} \left(h_{1c}^2 - h_0^2 - \frac{N}{k} (x_1 - x_0)^2 \right) \quad (2.6.14b)$$



(初期地下水位勾配 $I_i=1.0\%$ 、堀割構造物の幅 $W=20\text{m}$ 、
堀割構造物の長さ $L_1=400\text{m}$ 、
堀割構造物解析境界までの距離 $L_2=L_3=190\text{m}$ の場合)

図 2.6.12 帯水層不完全遮断時の水位勾配変動係数の変化

この解析結果は、地下水位勾配変動係数(上・下流側の水位変動量)は、帯水層の残存率に影響を受けるものの、地下水流向と構造物のなす角度の影響は小さいことを表している。

これは、前項で示した結果(地下水流直交断面への投影長に比例する)と矛盾するものである。前項までの検討モデルと比較すると、本計算法では帯水層を平面的に完全遮断したモデルについて検討していることが異なり、この要因に由来すると考えられる。

参考文献

2. 調査で参考、引用、参照した文献を以下にまとめる。

- 足立紀尚, 龍岡文夫共著(1985), 新体系土木工学 18, 土の力学(Ⅲ), 技報堂.
- 植下協, 川上浩, 大東憲二(1990), 3. 中部の地盤沈下, 土と基礎, Vol.38, No.392, 128.
- 生田雄健, 松本岸雄, 古山章一, 大野賢二(1995), 仙石線地下化工事における地下水保全対策, 土と基礎, vol.143, No.4, 41-42.
- 市原実編著(1993), 大阪層群 創元社, 70.
- 岩田進午, 喜田大三監修(1997), 土の影響圏, (株)フジ・テクノシステム発行, 363.
- 上田敏男(1996), 地下水流動調査, 地質と調査, No.68, '96年, 第2号, 19.
- 太田廣, 仲井信雄(1999), 揚水量削減の工夫を施した盤ぶくれ対策, 基礎工, vol.27, No.8, 43-45.
- 貝塚爽平, 太田洋子, 小嶋尚, 小池一之, 野上道男, 町田洋, 米倉伸之(1988), 写真と図でみる地形学, 46, 東京大学出版会.
- 川上浩(1989), コラプス沈下, 土と基礎, Vol.37, No.378, 76.
- 環境アセスメントの技術(1999), 4-12, 479-736, 社団法人 環境情報科学センター, 中央法規.
- 環境影響評価法(1999), 環境庁環境影響評価制度推進室監修, 株式会社 ギョウセイ.
- 環境白書(1999), 平成11年度版総説, 環境庁編.
- 環境庁水質保全局(1999), 土壌・地下水汚染に係る調査・対策指針運用基準.
- 片寄紀雄, 吉田幸一(1996), 上野地下駅における地下水位の上昇対策, 基礎工, Vol.24, No.2, 41-47.
- 黒山泰弘, 丸上豊, 嶋村貞夫, 濱野隆司, 三好忠和, 平田洋一(1993), 高透水性地盤における単孔式透水試験の適用, 第28回土質工学研究発表会講演集, 2249-2250.
- 建設省河川局(1993), 地下水調査および観測指針(案), 79, 財団法人 国土開発技術研究センター編集, 山海堂.
- 高坂信章(1999), 地下水流動保全工法の設計の考え方, 地下水地盤環境に関するシンポジウム'99-地下水の流動保全と地下環境-発表論文集, 115-134.
- 河野伊一郎, 西垣誠(1979), 地下水ハンドブック, 土質調査, 建設産業調査会発行, 281-295.
- 小林勲, 今野昭三, 岩崎光美(1983), 建設工事における濁水・泥水の処理工法, 53, 鹿島出版会.
- 最新地盤調査ハンドブック(1995), 建設産業調査会発行, pp.165, pp.342.
- 白石知成, 西垣誠, 河野伊一郎(1988), 数値解析による二次元・三次元カップリング浸透流解析手法の開発, 土木学会第43回年次講演会, Ⅲ, 868-869.
- 進士喜英, 小野紘一, 西垣誠(1988), 地盤掘削における排水流量の算定法に関する一考察, 土木学会第43回年次講演会, Ⅲ, 892-893.
- 進士喜英, 小野紘一, 西垣誠(1992), 遮水壁内への地下水浸透評価の二次元簡素化, 地下水学会誌, Vol.34, No.4, 241-252.

- 進士喜英, 狩野裕之, 和田卓也, 橋本正(1999), 地下水流動阻害の影響および対策工法の簡易計算法, 地下水地盤環境に関するシンポジウム'99-地下水の流動保全と地下環境-発表論文集, 97-114.
- 杉井俊夫, 山田公夫, 宇野尚雄, 中島賢(2000), 限界流速による浸透破壊の発生条件について, 地下水地盤環境に関するシンポジウム 2000 発表論文集, 地下水地盤環境に関する研究協議会, 33 - 40.
- 杉本隆男(1996), 建設工事と地下水について, 基礎工, pp.21.
- 大東憲二(1990), 単孔式現場透水試験法(飽和土の場合), 地質と調査, pp.9-14.
- 大東憲二, 植下協, 市川悦男(1996), 堀割構造物周辺の地下水流動保全に関する研究, 土木学会論文集, No.535/Ⅲ-34, 13-21.
- 竹内篤雄著(1996), 流動地下水調査法, 古今書院発行, 303.
- 玉野富雄, 小野諭, 福井聡, 鈴木宏昌(1995), 大深度地下工事に際しての地下水状態調査, 土と基礎 pp.33-35.
- 地下水ハンドブック(1998), 112, 144, 615, 351, 365, 建設産業調査会.
- 地盤工学ハンドブック(1999), 第5編 第2章 液状化と対策, 社団法人 地盤工学会.
- 通商産業省環境立地局監修(2000), 公害防止の技術と法規 水質編.
- 土山茂希, 早川誠, 中村晋, 辻野修一(1988), 濃尾平野における軟弱地盤の液状化特性, 土と基礎, Vol.36, No.367, 19.
- 椿東一郎, 荒木正夫(1961), 水理学演習下巻, 森北出版, 311-315.
- 出口博一, 福田雅友, 椋浦正人, 田中信幸, 橋本正, 有本弘孝(1996), 京都市地下鉄烏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 発表論文集, 123-134.
- 東京都建設局(1997), 工事に伴う環境調査要領.
- 土質基礎工学会ライブラリー 19(1980), 建設工事と地下水, 社団法人 土質工学会.
- 土質基礎工学会ライブラリー 20(1981), 緑化・植栽工の基礎と応用, 社団法人 土質工学会.
- 土質基礎工学会ライブラリー 34(1989), 近接施工, 社団法人 土質工学会.
- 土質工学会編(1993), 液状化対策の調査・設計から施工まで, 現場技術者のための土と基礎シリーズ 20, 社団法人 土質工学会.
- 土質工学ハンドブック(1982), 658, 社団法人 土質工学会.
- 土質調査法(1990), 第14章 特殊な測定・調査, 748-749.
- 土橋浩, 並川賢治, 多田浩治, 松田義則(1999), 通水性RC地中連続壁の設計・施工, 地下水地盤環境に関するシンポジウム'99-地下水の流動保全と地下水環境-発表論文集, 63-78.
- 土木学会(1996), トンネル標準示方書(山岳編)・同解説, 土木学会, 25.
- 永井宏, 西垣誠, 宇野尚雄, 柳田三徳(1995), 道路建設の切土区間における地下水環境保全のための復水工法の検討, 土木学会論文報告集, No.516, 15-25.
- 西垣誠(1993), 大深度構造物建設のための地下水調査, 基礎工, pp.16-23.

- 西垣誠, 進士喜英(1998), AC-GWAPユーザーマニュアル, 地下水学会地下水解析講習会テキスト.
- 日本道路公団設計要領第一集(1998), 土工編 1-37, 設計に用いる土質定数, 土工編 5-5, 軟弱地盤の定義, 造園編, 70-76, 社団法人 日本道路公団.
- 阪神電気鉄道(株), (財) 大阪土質試験所(1984), 本線福島附近地下化工事の内昭和 58 年度揚・注水試験調査工事 報告書.
- 平山光信(1994), 地下水の流速・流向の計測法, 地下水学会誌, 第 36 巻第 3 号, 310.
- 前川統一郎, 中島誠(1998), 地下水汚染の調査・計測における現状と今後の展望, 地質と調査, 第 3 号, 土木春秋社.
- 丸井敦尚, 安原正也, 石井武政(1996), 地質調査所版井戸データベースの概要, 地質とニュース, 第 502 号, 59-62.
- 水資源白書(1998), 平成 10 年版日本の水資源, 国土庁長官官房水資源部編.
- 三橋一也, 相川貞晴(1996), 造園技術必携 2, 造園植栽の設計と施工, 鹿島出版.
- 三宅紀治, 高坂信章(1999), 未固結地盤を対象にした多層水圧測定孔と観測井の設置方法, 地下水技術, 第 41 巻, 第 2 号, 1-11.
- 山口晴幸, 日比野忠史(1989), 各種地盤材料の毛管および不飽和浸透特性, 土と基礎, Vol.37, No.377.
- 山根一郎(1972), 土壌学の基礎と応用, 農山漁村文化協会.
- 山本荘毅(1983), 新版地下水調査法, 古今書院.
- 山本荘毅(1985), 新版地下水調査法, 古今書院, 292.
- 若松加寿江(1992), 詳細な微地形分類による地盤表層の液状化被害の可能性評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B 分冊構造 I, 1443-1444.

【参考】構造物種類別許容変位量

〔掲載内容〕

1. 軌道

1.1 J R（在来線、新幹線）

- (1) 在来線軌道整備心得
- (2) 在来線軌道整備基準（規程）
- (3) 新幹線軌道整備心得
- (4) 新幹線道整備基準（規程）

1.2 公営交通（軌道整備心得、軌道保守基準等）

1.3 私鉄（軌道整備心得、軌道保守基準等）

1.4 モノレール（軌道狂い検査）

2. 構造物および基礎

2.1 J R（構造物設計標準解説、基礎構造物）

2.2 高速道路

2.3 送電鉄塔（送電用支持物設計基準、JEC-127-1979、電気学会）

3. 建築物

3.1 日本建築学会（建築基礎構造設計基準・同解説）

- (1) 圧密沈下に対する許容値
- (2) 即時沈下に対する許容値

1. 軌道

1.1 JR（在来線、新幹線）

(1) 在来線軌道整備心得

表一 1

(単位:mm)

線の区分 狂いの種別	1 級線	2 級線	3 級線	4 級線
軌間	○直径および半径600mを超える区間			20 (14)
	○半径200m以上600mまで			25 (19)
	○半径200m未満			20 (14)
高低 (mm/10m)	23 (15)	25 (17)	27 (19)	30 (22)
通り (mm/10m)	23 (15)	25 (17)	27 (19)	30 (22)
平面性 (mm/5m)	23 (18)			
	(カントの低減量を含む)			

(備考)

- ・ 数値は、高速軌道検測車による動的値を示す。ただし、() 内の数値は静的値を示す。
- ・ 平面性は、5m当たりの水準変化量を示す。
- ・ 曲線部におけるスラック、カントおよび正矢量（縦曲線を含む）は含まない。
- ・ 側線は、4 級線に準ずる。

「軌道」とはレール面から16mm以内の距離におけるレール頭部間の最短距離をいう。

「水準」とは軌間1067mmにおける左右レールの高さの差をいう。

「高低」とはレール頂部の長さ方向の凹凸をいう。

「通り」とはレール側面の長さ方向の凹凸をいう。

「線区の区分」は輸送量および重要度に応じて分けたもの。

(2) 在来線軌道整備基準（規程）

表一 2 乗心地基準値および仕上がり基準値

(単位:mm)

線級別 狂いの種別	乗心地整備基準値				仕上り基準値	
	1 級線	2 級線	3 級線	4 級線	各種別とも共通	
					一般区間	コンクリート 道床区間
軌間	+10 (+6) -5 (-4)				(+1) (-3)	(0) (-3)
水準	11 (7)	12 (8)	13 (9)	16 (11)	(4)	(2)
高低 (mm/10m)	13 (7)	14 (8)	16 (9)	19 (11)	(4)	(2)
通り (mm/10m)	13 (7)	14 (8)	16 (9)	19 (11)	(4)	(2)
平面性 (mm/5m)					(4) (カントの低減量を含まない)	

(備考)

- ・ 数値は高速軌道検測車による動的値を示す。ただし、() 内の数値は静的値を示す。
- ・ 平面性は、5m当たりの水準変化量を示す。
- ・ 曲線部におけるスラック、カントおよび正矢量（縦曲線を含む）は含まない。
- ・ 側線は、4 級線に準ずる。

(3) 新幹線軌道整備心得

表－3

線別 項目 単位		高速列車を運 転する区間	副本線，回送線及び 着発収容線を除く 区間	副本線，回送線及 び着発収容線	側線
軌間	mm	増 6 減 4	増 6 減 4	増 6 減 4	増 6 減 4
水準	mm	5	6	7	9
高低	mm/10m	7	8	9	10
通り	mm/10m	4	5	6	7
平面性	mm/2.5m	5	6	7	8

(備考) 曲線部においては、スラック、カント、および正矢量（縦曲線も含む）を差し引いたものとする。

(4) 新幹線軌道整備基準

表－4 仕上がり基準値（動的）

線別 検査項目	軌間 (mm)	水準 (mm)	高低 (mm)	通り (mm)	平面性 (mm)
列車速度 110 km/h をこえる本線	±2	3	4	3 (4)	3
列車速度 110 km/h 未満の本線	±2	4	5	3 (4)	4

(注) 通りの（ ）の数値は、通りの整正以外の工事種類に適用する。

1.2 公営交通（軌道整備心得、軌道保守基準等）

表－5

機関名		東京都， 名古屋市交通局		帝都高速度交通 営団		大阪市交通局		福岡市交通局	
項目		本線	側線	本線	側線	本線	側線	本線	側線
軌間 (mm)		+7,	+7,	+7,	—	+7,	+10,	+7,	+7,
		-4	-4	-4		-4	-4	-4	-4
水準 (mm)	直線	6	8	9	—	9	15	7	9
	曲線	7	9	—	—	9	15	7	9
高低 (mm/10m)		7	9	9	—	9	15	7	9
通り (mm/10m)	直線	5	7	9	—	9	15	7	9
	曲線	7	9	—	—	9	15	7	9
平面性 (mm/2.5m)		14	14	14	—	20 (3m当り)	—	18 (5m当り)	18 (5m当り)

1.3 私鉄（軌道整備心得、軌道保守基準等）

表－6. 1

機関名		西武, 京王, 京成		小田急		京浜急行		東急	
項目		本線	側線	本線	側線	本線	側線	本線	側線
軌間 (mm)		+7, -4	+7, -4	+7, -4	+7, -4	+7, -4	+7, -4	+7, -4	+7, -4
水準 (mm)	直線	7	10	7	10	6	13	6	10
	曲線	8	11	8	11	7	15	7	11
高低 (mm/10m)		8	11	8	11	7	11	7	11
通り (mm/10m)	直線	6	9	6	9	5	9	5	9
	曲線	8	11	6	11	7	11	7	11
平面性 (mm/2.5m)		—	—	13	13	—	—	18 (5m当り)	—

表－6. 2

機関名		名鉄 (1 級線)		近鉄 (1 級線)		阪急 (1 級線)		阪神 (1 級線)	
項目		本線	側線	本線	側線	本線	側線	本線	側線
軌間 (mm)		+7, -4	+7, -4	+7, -4	+7, -4	+6, -4	+6, -4	+7, -4	+7, -4
水準 (mm)	直線	7	7	7	10	7	11	9	12
	曲線	7	7	—	—	7	11	—	—
高低 (mm/10m)		7	7	7	11	7	11	7	11
通り (mm/10m)	直線	7	7	7	11	7	11	7	11
	曲線	7	7	—	—	7	11	—	—
平面性 (mm/2.5m)		—	—	—	—	18	18	—	—

表－6. 3

機関名		西鉄	
項目		本線	側線
軌間 (mm)		+7, -4	+7, -4
水準 (mm)	直線	6	10
	曲線	7	10
高低 (mm/10m)		7	10
通り (mm/10m)	直線	5	10
	曲線	7	11
平面性 (mm/2.5m)		—	—

1. 4 モノレール（軌道狂い検査）

表－7 検査項目および検査要領

検査項目	検査要領	検査値		検査 周期	備考	報告書 番号	
		限度値	標準値				
軌道桁	高低測定	良否	9/1000 ラジアン (折れ角)	0	1年	①列車の走行性（折れ角） ②変状 a 変状の推移 b 変状対策の有無 c 変状対策の資料 ③限度値または列車動揺が大き く、乗心地を害する場合の対策 資料。	報告 第2表 第3表
	通り測定	良否	11/1000 ラジアン	0	1年	同上	報告 第4表
	水準測定	良否	±10/800mm	0		①短い区間で水準狂い及びカント 狂いが限度値を超えても列車 動揺試験の結果、支障なければ 調整の省略ができる。	報告 第5表
	カント 測定	適否	±10/800mm	設定 カント値		②検査周期は軌道桁の調整また は架替えを行った都度行う ＋：カント測量過剰 －：カント測量不足	
	遊間測定	適否	M, M20～100 F, M15～100 F, F 5～100 mm	40mm	1年	鋼桁については軌道桁長により 基準値は別途定める。 M：可動支承 F：固定支承	報告 第6表
	コロ位置 測定	適否	7mm	25mm	1年		報告 第7表
	段違い 測定	良否	7mm	0		軌道桁の調整、架替え及び伸縮 縦目板を交換した場合、測定を 行う。	報告 第8表
	喰い違い 測定	良否	14mm	0		軌道桁の調整、架替えを行った 都度行う。	報告 第9表
	軌道桁幅 測定	良否	800±10mm	800mm		同上	報告 第9表
建築 限界	軌道桁 中心間隔	抵蝕の 有無	3700+15mm	3700mm		軌道桁の調整架替え及び 変状箇所のみ測定する。	報告 第10表
	雑木の 繁茂		側面3000mm 以上、下方 1000mm以上	側面4000mm 以上、下方 1000mm以上	6ヶ月	側面は桁中心からの離れ。 下方は桁下端部からの離れ。	
	その他 構造物	抵蝕の 有無	側面1925mm 以上、下方 611mm以上	側面2500mm 以上、下方 2000mm以上	6ヶ月	側面は桁中心からの離れ。 下方は桁下端部からの離れ。	報告 第11表

- ・ 高低、通り、水準、カント、段違い及び喰い違いで限界値内であっても、列車の動揺が大きく、乗心地を害する場合は軌道桁の単体を測定し、操作誤差を考慮し据値調整を行う。
- ・ 調査測定のうち限度値を過して調整の必要な場合は、報告第19表により技術部長に報告する。
- ・ 高低、通り、水準、桁遊間、段違い、喰い違いおよびカントが限度値を超えていても、列車速度が遅く、かつ運転に支障なければ調整を行わないことができる。

（東京モノレール株式会社）

2. 構造物および基礎

2.1 JR（建造物設計標準解説、基礎構造物）

○ 構造物および基礎の許容変位量
(1) 構造物の許容変位量は、次の各項を考慮して定めなければならない。
(a) 列車を支持する構造物において、列車の走行安全性、乗心地、軌道に与える影響等から定められた許容不同変位量。
(b) 河川、鉄道、道路等を横断する構造物において、建築限界および所要の空頭から定まる許容絶対（または相対）変位量。
(c) 不静定構造物において、構造物全体に与える影響から定まる許容不同変位量。
(d) 構造物の機能を保持するために必要な許容不同変位量。
(2) 基礎の許容変位量は、構造物の許容変位量および基礎の変位による地盤への影響を慮して定めなければならない。

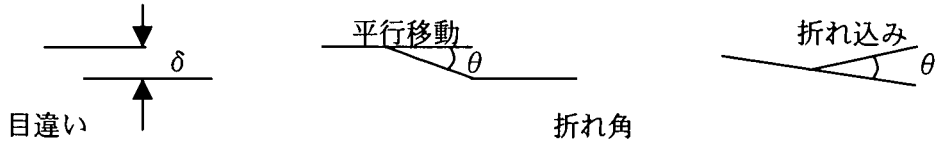
（注意）これは、あくまで構造物を設計する際に考慮すべき許容変位量の目安である。

表－8 列車を支持する構造物のレールレベルでの許容不同変位量（常時、一時）

変位の方向	列車速度 (km/h)	目違い δ (mm)	折れ角 θ (1/1000)			
			平行移動		折れ込み	
			$L < 30m$	$30m \leq L$	$L < 30m$	$30m \leq L$
鉛直	70	2	9	9	9	9
	110		7.5	9	9	9
	160		5	6	6.5	7
	210		4.5	4	5.5	4.5
	260		3.5	3	4	3
水平	70	2	6	6	6	6
	110		4	5.5	5	6
	160		3	3	3.5	4
	210		2.5	2	3	2.5
	260	1.5	2	1.5	2.5	2

注1) バラスト軌道の場合は、目違い検討を行わなくてよい（常時、一時の場合）。

注2) 用語の意味は、下図のとおりである。



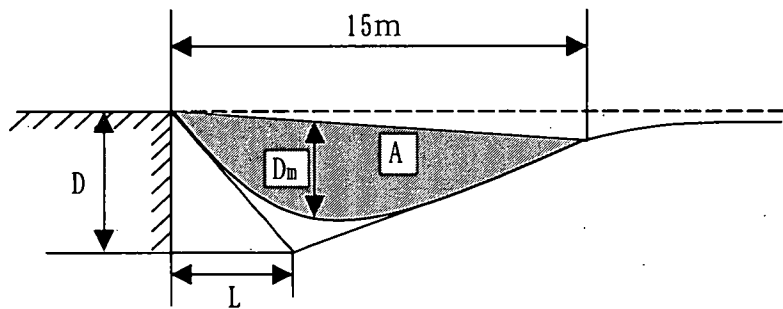
注3) L は桁長またはラーメン高架橋のブロック長等を表す。

2. 2 高速道路

・東名高速道路の段差補修に関する調査（昭和46年3月）

表－9 客観評価特性因子と補修基準値（PSR \leq 2.5）

客観的評価特性因子			補修基準値
沈下量	D (cm)	L<5m	3.0以上
		L \geq 5m	5.0
	D _m (cm)		2.5
上下方向の加速度	α (g)		0.2
沈下勾配	D/L (%)		1.0
沈下面積	A (cm ²)		2000
沈下量と沈下勾配の相乗	D・D/L (cm・%)		3.0



調査方法は、判定員28名が中型バスに乗車し、橋梁裏込部を80km/hで走行し、各裏込部の乗心地評価を5点法と許容法で判定したものである。この結果、PSR=2.5の場合に「許容できる」とする人と「許容できない人」とする人の割合が50%ずつとなるので、PSR \leq 2.5では補修を行う必要があるとして提案された基準値が表－9である。

2. 3 送電鉄塔（送電用支持物設計基準、JEC-127-1979、電気学会）

一般に、鉄塔の場合は各脚ごとに独立した基礎となるため、脚ごとの絶対変位量よりも脚間相対変位（不同変位）が問題とされるが、鉄塔構造体としての裕度やボルトクリアランスによる変位量の吸収等を考慮すれば、不同変位量は鉄塔脚間距離に対して、鉛直方向に1/200、また水平方向に1/800程度まで許容できると考えられている。

3. 建築物

3.1 日本建築学会（建築基礎構造設計基準・同解説）

(1) 圧密沈下に対する許容値

表－10 圧密粘土層上の建物の限界¹⁾

構造種別	変形角 θ ($\times 10^{-3}$ rad)		基礎形式	相対沈下量	総沈下量
	下限	上限		S_{Dmax} (cm)	S_{Dmax} (cm)
				上限	上限
コンクリートブロック造	0.3 (1.0)	1.0 (2.0)	布	2	4
鉄筋コンクリート造 (ラーメン構造)	0.7 (1.0)	1.5 (2.0)	独立	3	15
			布・べた	4	20
鉄筋コンクリート造 (壁式構造)	0.8	1.8	布	4	20

- ・ 下限とは、有害なひび割れが発生するかしないかの境界の状態に対応している。
- ・ 上限とは、有害なひび割れが発生する率が極めて高い状態に対応している。
- ・ () 内の値は文献2) による²⁾。

表－11 許容相対沈下量（圧密沈下の場合）（単位：cm）

構造種別	コンクリート ブロック造	鉄筋コンクリート造		
基礎形式	連続（布）基礎	独立基礎	連続（布）基礎	べた基礎
標準値	1.0	1.5	3.0	2.0～(3.0)
最大値	2.0	3.0	4.0	4.0～(6.0)

() 内は大きい梁せい、あるいは2重スラブ等で十分に剛性が大きい場

表－12 許容最大沈下量（圧密沈下の場合）（単位：cm）

構造種別	コンクリート ブロック造	鉄筋コンクリート造		
基礎形式	連続（布）基礎	独立基礎	連続（布）基礎	べた基礎
標準値	2	5	10	10～(15)
最大値	4	10	20	20～(30)

() 内は大きい梁せい、あるいは2重スラブ等で十分に剛性が大きい場

(2) 即時沈下に対する許容値

表－１３ 即時沈下に対する建物の限界値

支持地盤	構造種別	基礎形式	変形角 θ ($\times 10^{-3}$ rad)		相対沈下量 S_{Dmax} (cm)	
			下限	上限	下限	上限
風化花崗岩 (まさ土)	鉄筋コンクリート造 (ラーメン構造)	独立	0.6	1.4	1.5以下	2.0
	鉄筋コンクリート造 (壁式構造)	布	0.7	1.7	1.5	2.0 以上
砂丘砂	コンクリートブロック造	布	0.3	1.0	—	0.8
	鉄筋コンクリート造 (ラーメン、壁式構造)	独立、布 べた	0.5	1.0	0.8	1.5
洪積粘土	鉄筋コンクリート造 (ラーメン構造)	独立	0.5	1.0	0.7	1.6
洪積礫層 風化花崗岩	鉄骨鉄筋コンクリート造	支持杭 地盤沈下量 5cm/年以下	0.7	1.5	1.0	2.0
	鉄筋コンクリート造 (ラーメン構造)	支持杭 地盤沈下量 15cm/年以上	0.4	1.0	0.7	1.5

注) 下限、上限の定義は表-10と同じ。

表－１４ 許容総沈下量 (即時沈下の場合) (単位: cm)

構造種別	コンクリート ブロック造	鉄筋コンクリート造		
基礎形式	連続(布)基礎	独立基礎	連続(布)基礎	べた基礎
標準値	1.5	2.0	2.5	3.0～(4.0)
最大値	2.0	3.0	4.0	6.0～(8.0)

() 内は大きい梁せい、あるいは2重スラブ等で十分剛性が大きい場合。

参考文献

- 1) 松浦 誠, 芳賀保夫: 土と基礎に関する構造物の挙動, 8, 建築物の不同沈下の実態 (その1), 土と基礎, Vol. 25, No. 1, 1977. 1, pp. 75～81.
- 2) Y. Ohsaki: Settlement and Crack Observation of Structures in Hiroshima, Report of the Building Research Institute, No. 21, 1957, pp. 27～83.

3. 設計

3.1 対策工法の基本的な考え方

地下水流動阻害についての影響評価の結果、対策工が必要と判断された場合、地下水流動保全工法を採用する。必要な地下水流動が確保できるよう設計を行う。

【解説】

地下水流動保全工法は、構造物および構造物を築造するための土留め壁により遮断される帯水層部分を何らかの方法により地下水が流れる構造とし、極力構造物建設前の地下水流動状況を確保しようとするものである。その仕組みは、遮断された帯水層の上流側で地下水を集水して（集水）、構造物部分はパイプなどを用いて通過させ（通水）、構造物の下流側の地盤中に地下水を還元する（涵養）ものである。その概念図を図 3.1.1 に示す。

この工法は、地盤から地下水を集め再び地盤に還元するための集水・涵養部と、構造物部分の受け渡し機能を有する通水部が主要な構成要素であり、これをいかに効率よく設計し施工するかが重要である。

地下水流動保全工法の具備すべき基本的要件は地下水の水位、流量、水質を変化させることなく、長期的にかつ面的に安定した地下水の流動を可能にすることである。このために、必要流量の通水が可能であり、浸透面積が大きく、維持管理が容易な構造で、イニシャルコストとランニングコストを考慮したトータルコストが安い、といったことに配慮した設計とすることが要求される。また、流動保全工法の採用により従来と全く異なった地下水流動状況になる可能性があることにも配慮して設計する必要がある。

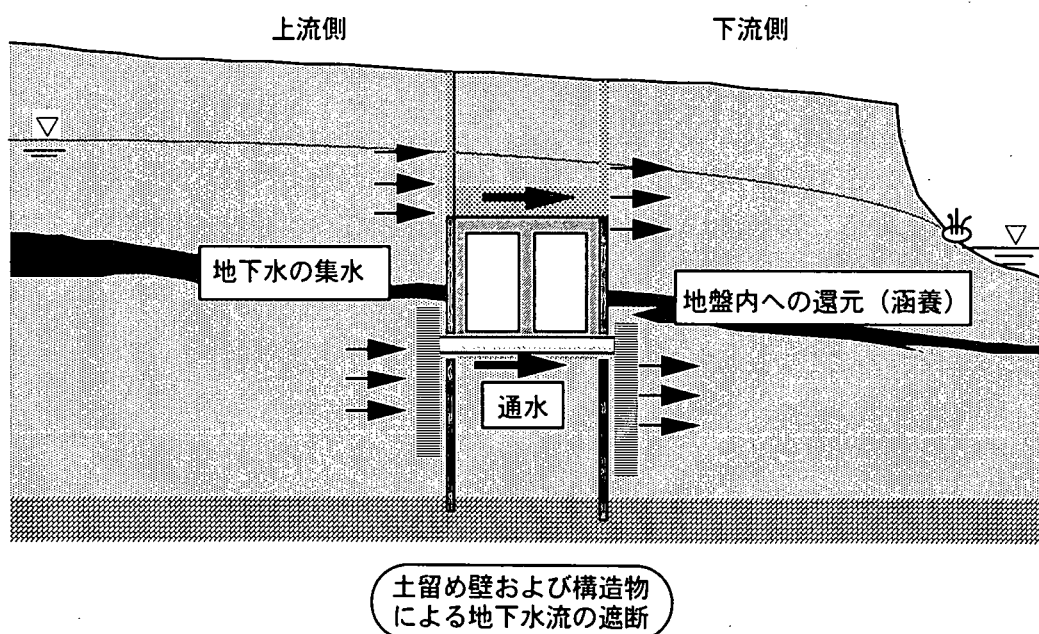


図 3.1.1 地下水流動保全工法の概念図と仕組み

3.2 設計フロー

調査・設計・施工の各段階で工法の必要性、妥当性を検証しながら検討を進める。

【解説】

設計を中心とした地下水流動保全工法の検討フローを図 3.2.1 に示す。

■ 調査段階

1) 自然（初期）状態の地下水環境評価

調査結果に基づき、構造物周辺における地下水位、地下水流動量を把握する。また、これに関与する広域地下水系の地盤条件・境界条件などを評価する（2.4 参照）。

2) 構造物建設時（無対策時）の影響評価

構造物を建設したときの現象項目（地下水位、地下水流動量）への影響を予測・評価する（2.6 参照）。

3) 評価基準 ε_0 （限界値）および ε_1 （許容値）の設定

構造物周辺の状況より、地盤沈下や井戸枯れなど環境影響（影響項目）に対する限界値を定め、これに対応する現象項目の限界値と許容値を設定する（2.5、2.6、3.4 参照）。

4) 対策の必要性検討

現象項目（地下水位変動、地下水流動量変化）に対する影響評価結果と許容値を比較して対策工の必要性を検討する。

■ 設計段階

5) 対策工法の方式選定

現場条件・施工条件に応じて対策工（集水・涵養部および通水部）の基本的方式を選定する（3.3 参照）。

6) 評価基準 ε_3 （設計値）の設定

現象項目（地下水位変動量、地下水流動量変化）に対し、対策工の初期性能として期待する設計値を設定する（3.4 参照）。

7) 対策工法の設計

選定した対策工の方式に応じて設計項目を定める（3.5 参照）。現場状況に応じた設計法を選定したうえで（3.6 参照）、設計値を満足できる対策工の仕様を決定する（3.7 参照）。

8) 対策工法の効果判定

対策工施工時の現象項目（地下水位変動、地下水流動量変化）の予測値が、設定した設計値を満足することを確認する。

■ 施工段階

9) 対策工の施工および稼動

設計結果に基づき対策工を施工し、稼動する。

10) 対策工法の効果確認

対策工稼動開始後、現象項目の計測を行い設計値が満足されていることを確認する。設計値が満足されていない場合には対策工の機能向上、追加などを行う。

11) 評価基準 ε_2 （管理値）の設定

現象項目（地下水位変動量、地下水流動量変化）に対し、対策工の長期的性能として期待する管理値を設定する（3.4 参照）。

12) メンテナンスの必要性判定

対策工稼働開始後は計測管理を行い（4.3 参照）、計測値が管理値を満足していない場合にはメンテナンスを行う。設計時には、対策工設置に必要なイニシャルコストとメンテナンスなどのランニングコストを合わせたトータルコストが最小となるような検討が必要である（3.8 参照）。

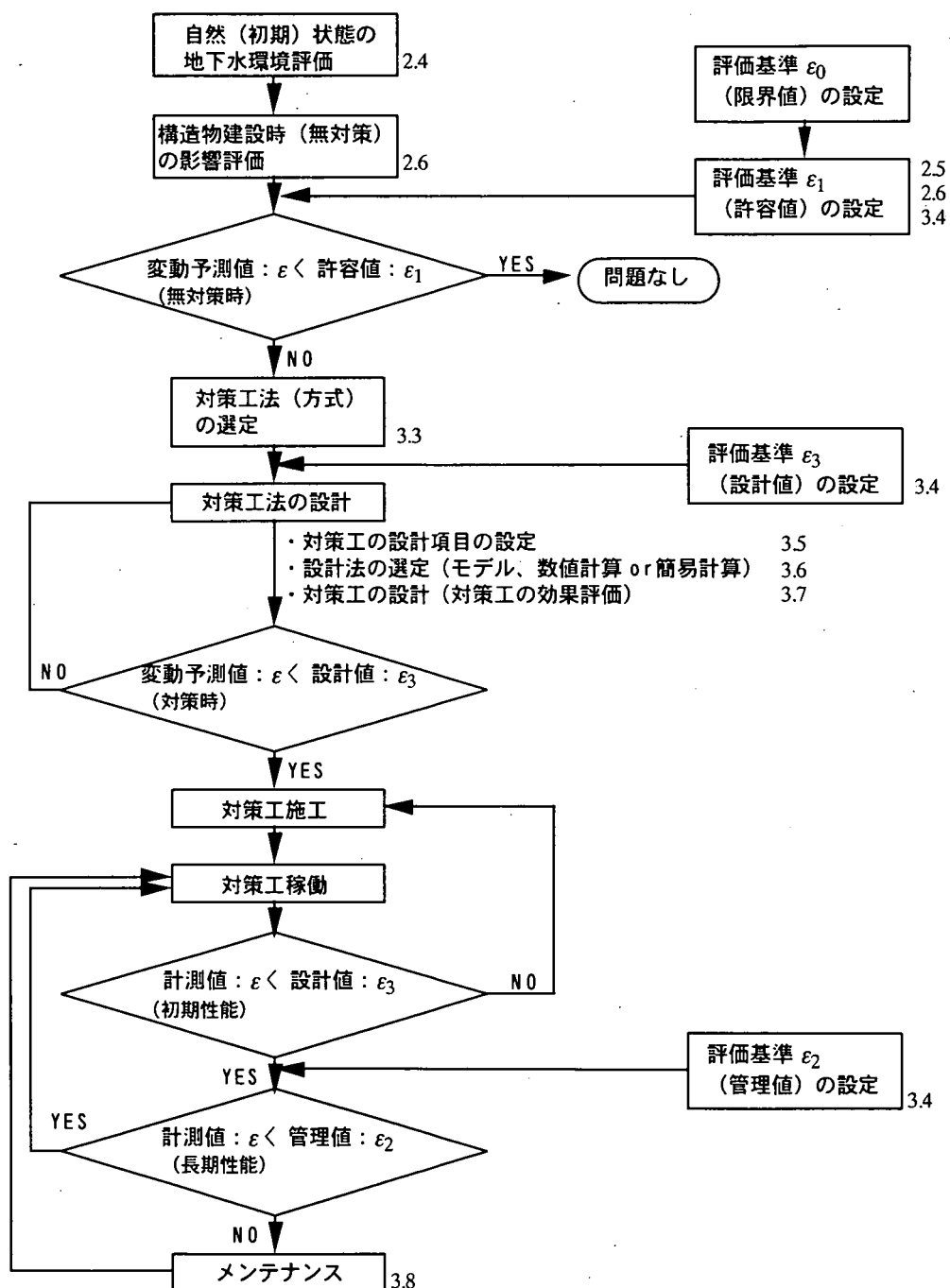


図 3.2.1 設計に関連する地下水流動保全工法の検討フロー

3.3 対策工法選定のポイント

工法選定にあたっては、

- (1) 帯水層と構造物の関係
- (2) 対策工法的方式
- (3) 対策工の施工時期

等を十分に検討し、現場状況、コストなどを含めて総合的に判断する。

3.3.1 帯水層と構造物の関係

地下水流動保全の方式を選定するうえで、帯水層が構造物のどの部分により遮断されるかが大きな与件になる。これを考慮して対策工法的方式を選定する。

【解説】

帯水層と構造物の関係の基本パターンを図 3.3.1 に示す。この図に示すように、

- (a) 構造物より浅い部分の土留め壁が帯水層を遮断する場合
- (b) 構造物本体が帯水層を遮断する場合
- (c) 土留め壁の根入れ部分が帯水層を遮断する場合

がある。当然、これらの複合的な遮断状況（たとえば構造物と土留め壁根入れ部による遮断）もあり得る。

遮断状況により選定すべき対策方式の適用性が大きく異なる。例えば、土留め壁の撤去という対策方式は(a)のケースでは有効であるが、(b)の場合には意味がない。(c)のケースでは技術的手法、コストなどに問題がある。

この例のように、対策方式の検討にあたっては地盤と構造物の深度関係を明確におさえる必要がある。

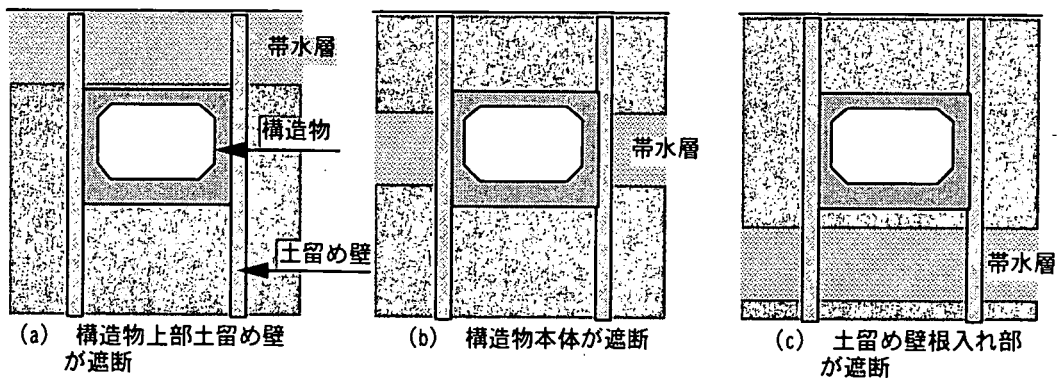


図 3.3.1 構造物と帯水層の深度による分類

3.3.2 対策工法の方式分類

対策工法は要素別に以下の観点から分類される。

- (1) 集水・涵養方式：地下水をどのように集めて、地盤に還元するか。
 - (2) 通水方式：上流側で集水した地下水をどこを経由して下流側へ受け渡すか。
 - (3) 通水動力：上流側で集水した地下水をどうやって下流側へ受け渡すか。
- 現場条件、施工条件などを考慮してこれらについて最適な方式を選定する。

【解説】

(1) 集水・涵養方式

地下水流動保全工法の方式を選定するうえで、最も重要な部分が集水・涵養部である。構造物により遮断される帯水層の上流側で地下水を集め、そして下流側で再び地盤に還元（涵養）する機能を有する部分である。

集水・涵養部においては地盤との接触面積をできるだけ大きくとる（点よりも線、線よりも面）ことが有効である。また、この接触部分の洗浄・目詰まり対策が確実に行えるような工夫が効果の確保には不可欠である。

基本的な分類と特徴を図 3.3.2 および以下に示す。

(a) 土留め壁を撤去する方式

この方式は構造物の構築完了後に、鋼矢板を引き抜く、あるいは土留め壁を取り壊すなどの方法で遮断物を取り除き流動機能を回復させる方法である。集水および涵養機能をもたせるという意味からは若干はズれるものであるが、帯水層と構造物の接触部分という観点で集水・涵養方式といえる。特殊な例として、土留め壁の一部を凍結工法により築造し、施工完了後にこの部分を解凍することによって地盤の透水性を回復させる方法がある。

この方式は構造物と帯水層の深度関係で構造物より浅い部分の土留め壁が帯水層を遮断する場合や土留め壁の根入れ部分が帯水層を遮断する場合、かつ土留めが鋼矢板で引き抜きが可能な場合に適用できる。構造物の施工が完了した時点で実施可能な方式である。掘削深度が浅い場合は、施工も容易でメンテナンスも不要である。

施工上の留意点として、フィルター層（埋め戻し材料）の選定、土留め壁の撤去方法、撤去時の出水対策（構造物構築中に撤去する場合）などの検討が必要である。また、鋼矢板引き抜き時や土留め壁の取り壊し時における周辺地盤変状に十分な配慮が必要である。

(b) 土留め壁を削孔し集水・涵養パイプを設置する方式

土留め壁設置後、本体構造物の構築時に土留め壁に穴を開けて地盤を削孔し、その中に集水・涵養パイプを設置する。パイプは水平方向あるいは地下構造物から斜め下方に向けて設置する。パイプの代わりにフィルター材を投入するだけの方法も考えられる。

施工時期は土留め壁施工完了後の地下工事期間中となり、問題が発生してから事後

対策としても採用できる。

他の集水・涵養方式と比べて帯水層との接触面積が大きくとれないため、設置個数を増やす（設置ピッチを小さくとる）必要がある。また、隣地境界などの関係から十分な長さの集水・涵養パイプを設置できない場合がある。

施工上の留意点として、土留め壁の削孔方法、削孔時の出水対策などに工夫が必要である。

(c) 集水・涵養機能付き土留め壁

土留め壁の一部に集水・涵養機能を有する部材を取り付けた状態で土留め壁を設置する方式である。近年、地下水流動保全の必要性の高まりから種々のものが考案、開発されてきている（巻末 地下水流動保全工法の現状 参照）。集水・涵養機能を有する部材の形状が線状のものと面状のものが考えられる。

広い集水・涵養面積が確保できることが特徴であるが、地盤と集水・涵養部材の接触部の洗浄を確実に行うことがこの方式のキーポイントであり、種々の工夫、検討がなされている。

また、土留め壁設置時に集水・涵養部材を取り付けておく必要があり、事前に設置ピッチ、設置個数、通水量などの設計検討が必要である。

(d) 集水・涵養井戸

土留め壁の外側に井戸を設置して地下水の集水・涵養を行う方式。井戸という汎用的な工法が主体であるので確実な効果が期待できる。また、井戸の設置は時期を問わない。そのため、必要に応じて設置本数を増やすなどの対応も可能である。

この方式の最大の問題は井戸の設置用地が確保できるかどうかである。都市部の土木工事では道路幅一杯に構造物が計画されることが多いため、井戸の設置用地を確保することが困難な場合が多い。

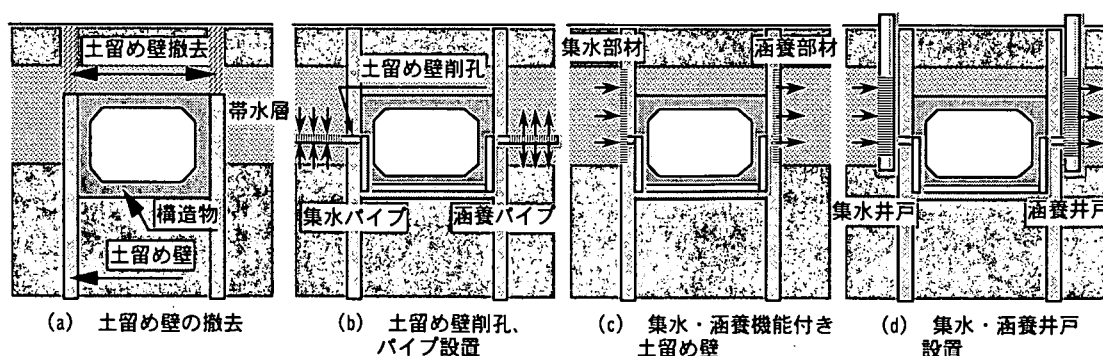


図 3.3.2 集水・涵養方式による工法の分類

(2) 通水方式

集水装置で集められた上流側帯水層の地下水は、構造物部分を通水され下流側へ導かれる。通水部は遮断される帯水層の代わりをなす部分である。通水部における損失水頭を可能なかぎり小さくすることが計画に必要である。通水方式としては以下が考えられる（図 3.3.3 参照）。

(a) 躯体下部通水方式

構造物躯体下部を通水ゾーンとして利用する方式。通水ゾーンとして原地盤である帯水層をそのまま用いるケースと、透水性の高いフィルター材に置換するケースが考えられる。

通水ゾーンとしてフィルター材置換を行った場合、この部分の損失水頭を小さくすることができる。しかし、構造物縦断方向に連続したフィルターゾーンが形成されると、この方向の流れが卓越する状態（地下河川）となり、元来とは異なる地下水流動状況となる可能性がある。

(b) 通水管方式（逆サイフォン通水）

上流側で集水した地下水をパイプを用いて下流側へ通水する方式。このパイプ内を満管状態としてサイフォンを効かせることにより効率的に通水できるので逆サイフォン通水とも呼ぶ。配管部の損失水頭が十分小さくなるように配管材料、管径、設置ピッチなどを決定する。

(c) 躯体上部通水方式

構造物躯体上部を通水ゾーンとして利用する方式。通水ゾーンとしては通常、透水性の高いフィルター材を埋め戻すケースが多い。

躯体下部通水方式と同様、構造物縦断方向の流れが卓越する可能性が高いため、所々にこの方向の流れを遮断する工夫（部分的に透水性の悪い材料で埋め戻すなど）が必要である。

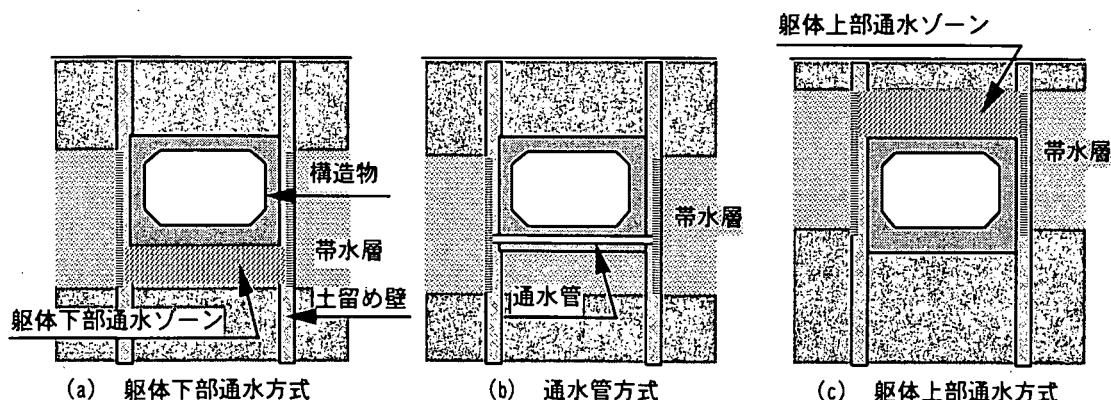


図 3.3.3 通水方式による対策工法の分類

(3) 通水動力

通水は上流側と下流側の水頭差による自然流下方式が一般的である。しかし、自然流下方式では十分な通水能力が確保できない場合や、サイフォンが有効に効かない場合にはポンプなど動力を用いた通水を行う方式も考えられる。

上流側での集水、下流側での涵養において周辺地下水とに大きな水頭差をつけることができるので、確実な能力増加が期待できる。しかし、水頭差を大きくしすぎると目詰まりや細粒分流出などが起こるため、適切な対策が必要である。また、ランニングコストが増大するという問題もある。

3.3.3 対策工の施工時期

採用する対策工の方式は、対策工の施工可能時期と、影響評価および対策工の効果検討時期との関係を考慮して選定する。

【解説】

対策工の方式により、土留め壁の施工前あるいは土留め壁と同時に施工する場合と土留め壁設置後に施工する場合がある。前者のケースは、土留め壁に対策工を施す工法を採用する場合で、設計段階に影響評価および対策工の効果評価を詳細に行っておく必要がある。後者は、土留め壁施工後に措置が可能な工法で、影響や対策工の効果を確認しながら対策工の検討が進められる利点がある。

3.3.4 集水・涵養方式と通水方式の組み合わせと選定

集水・涵養方式と通水方式には適合性の高い組み合わせと、そうでないものがある。これを考慮したうえで通水システムとしての総合的な性能が発揮できるように対策工の方式を選定する。

【解説】

地下水流動保全工法においては、集水・涵養方式と通水方式が重要な構成要素である。表 3.3.1 にこれらの組み合わせについてまとめた。施工事例があり適合性が高いものは◎、施工事例があるものは○、施工事例はないが適用可能なものは△をつけた。

これら各方式と実際の施工事例の関係については、4. 施工・メンテナンスにおいて詳述する。

表 3.3.1 集水・涵養方式と通水方式との組み合わせ

集水・涵養 方式 通水方式	土留め壁						4. 集水・涵養井戸	
	1. 土留め壁撤去		2. 土留め壁削孔 集水・涵養パイプ		3. 集水・涵養機能 付き土留め壁			
A. 躯体下部通水	A-1.	○	A-2	△	A-3	△	A-4	△
B. 通水管	B-1	○	B-2	◎	B-3	◎	B-4	◎
C. 躯体上部通水	C-1	◎	C-2	△	C-3	△	C-4	△
土留め壁の施工 時期との関係	土留め（地下工事） の完了後		土留め壁の施工後		土留め壁に先行設置		随時	

◎：施工実績があり適合性の高い組み合わせ

○：施工事例あり

△：施工事例はないが適用可能

3.4 評価基準

地下水流動保全工法の設計にあたっては工法の必要性、妥当性を検討・評価するために以下の評価基準を定める。

- (1) 限界値： ε_0
- (2) 許容値： ε_1
- (3) 管理値： ε_2
- (4) 設計値： ε_3

現象項目に対しこれらの評価基準を設定し、設計フロー各段階において予測値、計測値との比較検討を行う。

【解説】

地下水流動保全工法の設計においては図3.2.1のフロー図に示すように4つの評価基準を定める必要がある。これらは以下の意味合いを持つものである。この関係を図3.4.1に示す。

- (1) 限界値： ε_0

対象地域における現象項目の許容最大変動量。つまり、これ以上の変動が生じた場合、何らかの環境影響が発生する。したがって、絶対に超えてはならない基準値。影響項目の限界値（例えば被害とみなされる地盤沈下量）が定められれば、影響項目と現象項目との関係から設定される。

- (2) 許容値： ε_1

対象地域における現象項目の許容変動量。限界値に地盤調査の不確実性などを考慮した安全率を見込んで設定する。したがって、調査精度が高ければ限界値＝許容値と設定することが可能であり、調査精度が低ければ余裕幅を大きくとる必要がある。地下水流動保全工法の採否を判定するための基準値。

- (3) 管理値： ε_2

地下水流動保全工法の供用開始後、計測管理を行う段階での許容変動量。管理値以上の変動が生じる前にメンテナンスなどの性能回復を行う。計測ポイントと現象発生ポイントとの変動量の差、メンテナンスなど対策実施までの時間的余裕などを考慮した余裕幅を許容値に見込んで設定する。したがって、計測ポイント数が多くメンテナンスが容易に実施できる体制が整っていれば許容値＝管理値と設定することが可能である。メンテナンスの実施時期を判定する基準値。つまり、地下水流動保全工法の長期性能目標値。

- (4) 設計値： ε_3

地下水流動保全工法の供用開始後、初期の段階での許容変動量。この設計値を目標に地下水流動保全工法の設計を行う。地下水流動保全工法は連続的な稼動により目詰まりなどによる性能低下が予想される。管理値にこの性能低下を見込んで設計値を設定する。長期的な性能低下が小さければ管理値＝設計値と設定することが可能であるが、長期的な性能低下が予想以上に大きい場合にはメンテナンスを頻繁に行うことになる。地下水流動保全工法の初期性能目標値。

実際の工事においては設計値に対する設計仕様に、施工の不確実性を考慮した安全率

を見込んで工法の仕様を決定することになる。

評価基準設定の例

- ・地下水位の低下による地盤沈下が予想される現場。
- ・地盤沈下の限界値（これ以上沈下すると家屋の機能障害などが発生する）は 10mm と設定される。地下水位低下量と地盤沈下量との関係から 1m の水位低下が発生すると 10mm の地盤沈下が発生することが想定され、水位低下量 1m を限界値と定める。
- ・これに地盤調査の不確実性を考慮して地下水位低下量の許容値は 0.8m とする。
- ・影響評価検討の結果 1.5m の水位低下が発生することが予想されたため、地下水流動保全工法の採用を検討する。
- ・流動保全工法の稼働期間中は管理値を水位低下量 0.7m と定め、観測井における水位低下が 0.7m 程度になった段階でメンテナンスを行う。
- ・流動保全工法の長期的性能（水位低下量 0.7m）を確保するために、稼働開始時点では観測井における水位低下量 0.5m を設計値（初期性能目標値）とする。

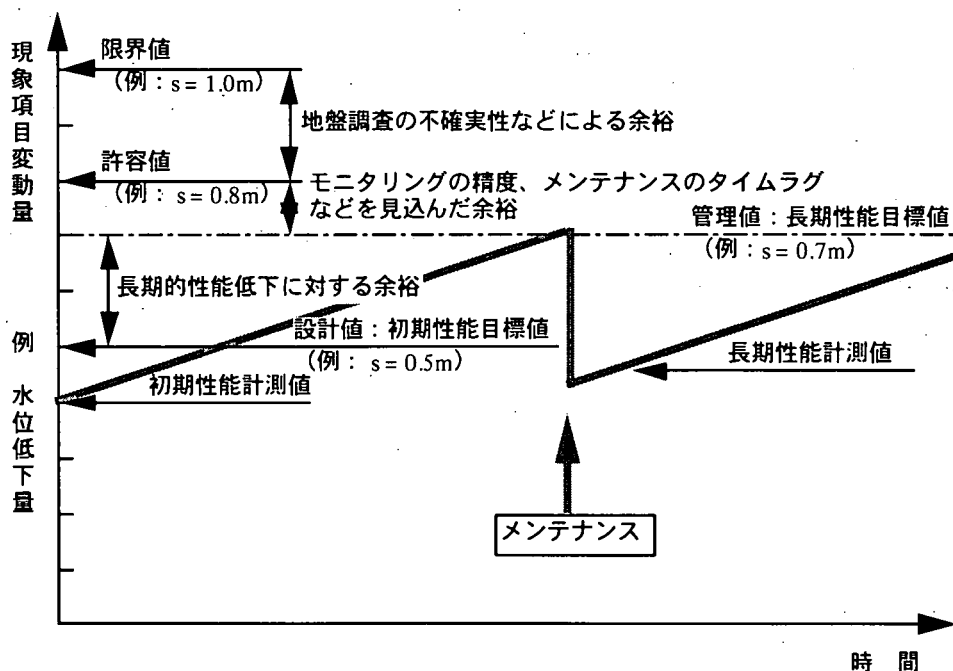


図 3.4.1 地下水流動保全工法における評価基準の概要

3.5 対策工の設計項目

対策工の方式ごとに設計項目を定め、適切な計算法を用いてその仕様を決定する。

【解説】

設計においては、選定した対策工の方式に応じた設計パラメータを明確にして、これを適切な計算法（3.7 参照）を用いて決定する。対策工の方式ごとの主な設計項目を表 3.5.1 に示す。これらは、

- ・ 設置間隔に関する項目
- ・ 個々の性能に関する項目
- ・ 対象帯水層（深度）に関する項目

に大別される。このうち対象帯水層（深度）に関する項目は地盤条件によりほぼ決定されるため自由度は小さい。また、集水・涵養部の対策方式のうちパイプ型、土留め壁に設置する線状の装置、井戸型のものは、個々の性能（井戸径など）が施工条件、施工機械などで決定される部分が多い。したがって、設置間隔が主たる設計項目となる。

連続型の対策方式（土留め壁撤去、面状の集水・涵養機能付き土留め壁、通水層など）では、設置間隔とその幅が重要な設計ファクターとなる。設置間隔 a = 幅 b とした場合は、完全に連続した対策となることを意味する。 $a > b$ のときは、間隔 a ごとに幅 $(a - b)$ の無対策区間が設けられる。

通水部に通水パイプを用いる場合、一般的には通水パイプの設置間隔は集水・涵養部の設置間隔から決定される。通水パイプはその径が比較的自由に選定できるので、設置間隔からその性能（パイプ径、材質など）を決定する。

表 3.5.1 対策工の方式ごとの主な設計項目

	対策工の方式	設置間隔	個々の性能に関する項目	対象帯水層に関する項目
集水・ 涵養部	土留め壁撤去	撤去部間隔： a	撤去部幅： b	撤去深度： z
	集水・涵養パイプ	設置ピッチ： a	パイプ径： r_w パイプ長さ： l	設置深度： z 設置角度： ϕ
	集水・涵養機能付き 土留め壁(線状)	設置ピッチ： a	等価半径： r_w	集水・涵養部深度： z
	集水・涵養機能付き 土留め壁(面状)	設置ピッチ： a	設置部幅： b フィルター層厚さ： d フィルター層透水係数： k_f	フィルター層深度： z
	集水・涵養井戸	設置ピッチ： a	井戸半径： r_w	スクリーン深度： z
通水部	通水層	通水部間隔： a	通水部幅： b 通水部透水係数： k	
	通水パイプ	設置ピッチ： a	通水パイプ径： D	

3.6 設計計算

3.6.1 設備設計のフロー

地下水流動保全工法の設備設計は図 3.6.1 のフローにしたがう。

【解説】

図 3.6.1 は図 3.2.1 に示した全体検討フローのうち、“対策工法の設計”の部分の詳細を表したものである。井戸のような線状の集水・涵養設備をメインとしたものであるが、面状の集水・涵養設備の設計もこのフローに準じる。3.7 に示した設計計算法はこのフロー中の各項目に対応したものである。3.7.2 の数値計算を用いれば、このフロー全体の検討を一括して行うことができる。

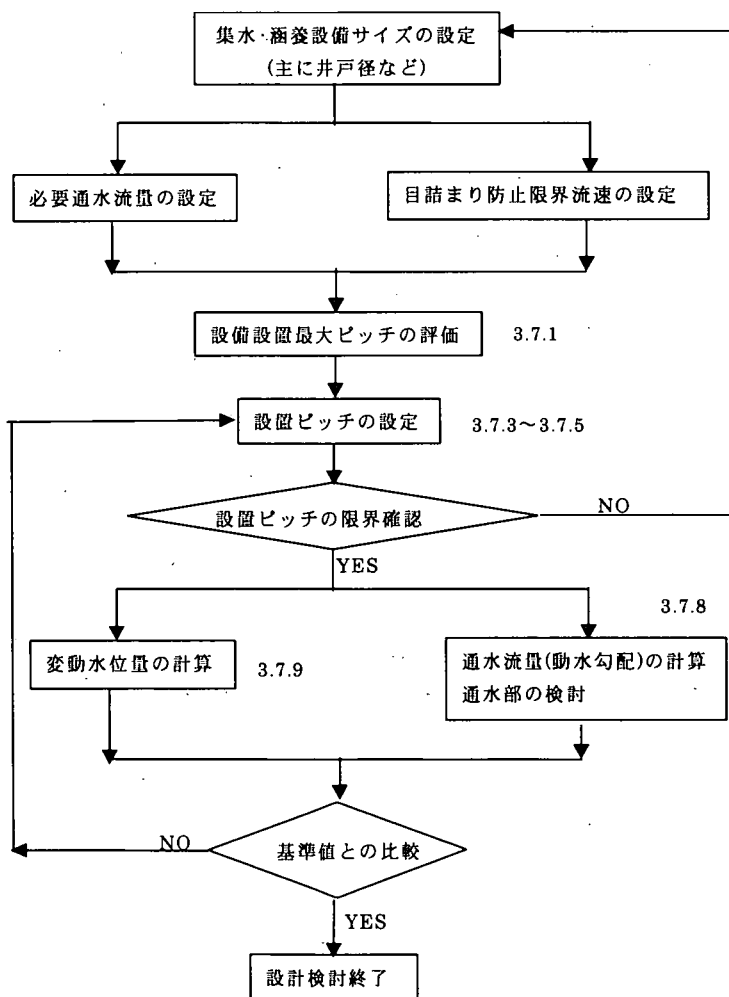


図 3.6.1 設備設計の基本的フロー

3.6.2 基本的な検討項目

3.5 で選定した対策工法毎に必要なとなる設備の数量、配置などの設計計算を行う。

また、設計においては適切な安全率を考慮する。

【解説】

計算法として 3.7 にまとめるように対策工の方式に応じたいくつかの方法が提案されているが、いずれも以下の共通した基本的項目に対する検討を行う。

(1) 基本検討項目

基本的な検討項目は以下の 4 項目である。

- ① 帯水層の目詰まり防止
- ② 設計水位変動量の達成
- ③ 設計通水流量変動の達成
- ④ 設計通水部流量の確保

① 帯水層の目詰まり防止

流動保全工法の集水・涵養施設は、遮断面に対して面状に設置されるか、井戸などのようにある程度の設置ピッチを有して設置されるかに大別できる。自然地下水流れ場をみると、前者は本来の流れ場を損なう懸念が少ないが、後者では施設近傍で地下水流の集中がみられ地下水流速が増加する。このような流速増大による帯水層の目詰まりを防止するために、集水・涵養部が帯水層と接する面積、設置ピッチ、必要通水流量と目詰まり防止限界流速の関係から、これらの諸元の設置可能限界を明らかにする。また、設置ピッチが非常に短くなり施工不能である場合には、面状施設に変更する必要もあり、集水・涵養施設に対する帯水層の目詰まり検討は、最優先に行う。

目詰まりが想定される場合の対応として以下の方法がある。

- ・ 集水・涵養施設規模(帯水層と接する面積の増大)
- ・ 設置ピッチの縮小
- ・ 面状施設への変更

②および③ 設計水位および通水流量変動の達成

保全工法の主たる検討項目であり、①の検討結果を踏まえてこれらの設計基準を達成できるよう個々の施設を設計する。

十分な性能が達成できない場合には、以下の仕様変更を検討する。

- ・ 集水・涵養施設規模(帯水層と接する面積の増大)
- ・ 設置ピッチの縮小
- ・ 面状施設への変更

④ 設計通水部流量の達成

対をなす集水・涵養施設間の分担通水流量を流す通水施設の設計であり、本体構造物内あるいはその上下に通水施設が設置できるか否かの検討を行う。

所定の通水流量が確保できない場合には、通水部能力の増大が必要であり、以下の変

更がなされる。

- ・通水面積の増大(通水管径・面積増大、通水管数の増加)
- ・通水損失の低減(通水管材料の再考、透水性の増大)

また、通水部両端での水位差を大きくし動水勾配を大きくすることは通水流量増加に効果的である。しかし、流動保全工法の主目的である「構造物の上流・下流間で大きな水位差を生じさせない」という設計目標に反する考え方であり、自然流下方式では採用できない。ポンプなどを用いた強制通水はこの考え方によるものであるが、一般的でない。

(2) 設計安全率の考え方

3.4 に示す複数の評価基準によって、地盤と流動保全工法システム全体に関する不確実性を考慮することができる。しかし、個々の施設に対してもその能力に対する安全率(あるいは余裕率)を設計計算に導入する必要がある。

以下に安全率設定の考え方を挙げる。

① 集水・涵養設備

地下水が集水・涵養設備に流入・流出するまでの能力限界は地盤の限界流速の導入で考慮できるが、これらの設備自体の能力(例えば井戸損失に類する能力低減要因)を考慮する必要がある。この種の能力低減は、削井時の洗浄不足による低透水ゾーンの残存、土粒子移動・微生物・化学反応などによるストレーナ部の目詰まりなどによるものである。尚、揚水を目的とした井戸などでは揚水流量が多いため、井戸周辺で生じる乱流などに起因する能力低減の可能性があるが、流動保全工法では分担流量(集水量、涵養量)が少ないことから、乱流による能力低減は通常考慮しなくてよい(現地試験によってサイト毎に確認すれば明確になる)。

計算上は、井戸損失を損失水頭で表現する方法と、限界流量で表現する方法が提案されている。

② 通水層やフィルター層

これらの透水層は透水係数と通水断面積の積をもって通水能力を評価する。この通水能力については、施工時の過度な締め固めや洗浄不足、また長期供用中の目詰まりなどによる能力低下が想定される。

③ 通水管

通水管の通水能力は、通水断面積、管内抵抗および動水勾配で表現される。長期供用中の劣化による管内抵抗増大や、低動水勾配時の流入土粒子などの沈殿による通水断面積低減などが想定される。

計算上は、通水部両端水位差を自然勾配よりも小さくする設計動水勾配による方法や損失水頭を考慮する方法が提案されている。

現段階では、これらの安全率設定にあたり、定量的な数値を提案することは困難である。いずれの設備も施工事例が少なく供用期間も短かいため、豊富な情報があるとはいえないためである。今後の観測事例増加とそのデータ評価に期待する。このため、現状では十分な安全率を考慮することを推奨するが、洗浄や取替えなどメンテナンスによる対応を考慮することにより、安全率や余裕度を小さくすることも考えられる。

3.6.3 計算法の概要

影響評価と対策効果予測（設計計算）では同一モデルを適用して定量的評価を行う。対策設備による地下水挙動が複雑になり影響評価モデルをそのまま適用することが難しい場合には、対策効果予測で用いたモデルで再度影響評価を行い、同じ解析レベルで評価を行う。

【解説】

計算法の概要については 2.6.3 を参照すること。

図 3.2.1 に示す影響評価時の計算法と対策工の効果予測時の計算法が異なると、精度的な問題から正当な評価がなされない可能性がある。このため、両者で同様の計算法を用いることが望ましい。

3.7 計算法

地下水流動保全工法の設計にあたっては、採用する工法に適合した計算法を選択する。

【解説】

本節で説明する計算法は以下の位置づけを有するものである。

3.7.1：集水・涵養装置近傍における流速が限界流速を超えないように集水・涵養装置の仕様を定めるための計算法。いずれの場合もこの計算を行い、ここで計算された集水・涵養装置の設置間隔以下で以降の検討を行う。

3.7.2：有限要素法などの数値計算を用いた設計計算の説明。集水・涵養装置、通水部を含めた総合的な設計計算が行える。同時に、任意点の水位変動などを評価できる。

3.7.3～3.7.7：集水・涵養装置の簡易計算法。方式ごとに計算法を説明しているので、採用する方式に応じた計算法を用いる。

3.7.8：通水部の設計計算法。数値計算を行う場合も併用できる。

3.7.9：簡易計算法を用いて設計を行ったとき、影響発生予測地点の水位変動を計算する方法。この結果により、設計の妥当性を検証する。

3.7.1 限界流速に基づく設計計算(最大設置ピッチの設定)

地下水流動保全工法においては、集水・涵養装置近傍で地盤内の流速が最も速くなる。この流速が土粒子の移動に関する限界流速や、層流から乱流へ遷移する限界流速を超えないように集水・涵養装置の仕様を決定する。

【解説】

集水・涵養装置の近傍においては、集水側では流線が集中し、涵養側では流線が拡散するため、大きな流速が発生する。特に、集水・涵養装置として井戸型のものや水平パイプ型のものを用いる場合には流れの集中度が大きい。この流速が以下に挙げる 2 つの限界流速の小さいもの以下になるように設計する。

- (1) 土粒子の移動に関する限界流速
- (2) 層流から乱流へ遷移する限界流速

(1) 土粒子の移動に関する限界流速

地盤中の土粒子（特に細粒分）は、流速の増大に伴う浸透力を受け、ある流速を超えた段階で移動を開始する。この流速が土粒子の移動に関する限界流速といわれるものである。土粒子移動に関する限界流速を超えると、上流側の集水装置近傍では地盤面から装置内部への土粒子の流出が、また下流側の涵養装置近傍では土粒子移動に伴う目詰まりが発生する可能性が高い。このような観点から、地盤内の最大流速が土粒子移動に関する限界流速を超えないように集水・涵養装置の設計を行う。

流速には、地盤中の平均的な流速を表すダルシー流速と、地盤の間隙を考慮した実流速がある。実流速 v_p は、ダルシー流速（見掛けの流速） v_d を間隙率 n で割った値 $v_p = v_d / n$ にて表される。これまで、土粒子の移動に関する研究は、パイピングやボイリングのような浸透破壊現象に対して行われてきた。そのため、鉛直上向き方向の流れを取り扱ったものが多い。集水・涵養装置近傍の流れは、水平方向流れが主体であるため、これまでの研究成果をそのまま利用することはできないが、土橋ら（1999）が実施した実験結果（図 3.7.1）によれば D_{10} および D_{20} を指標とした限界流速は既往の研究結果（例えば、大野ら 1984）とほぼ一致している。なおこの図では限界流速は実流速（単位 cm/s）にて表されている。

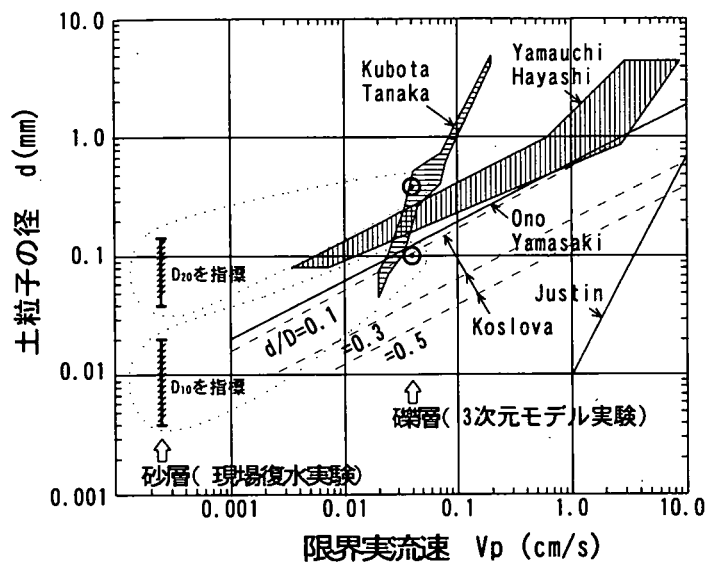


図 3.7.1 土粒子の粒径と限界実流速の関係

(2) 層流から乱流へ遷移する限界流速

地盤中の地下水の流れが層流から乱流へ遷移するときの見掛けの限界流速は、

$$v_{cR} = n \frac{R_{ec} \nu}{d_s} \quad (3.7.1)$$

により表される。ここに、 R_{ec} ：層流から乱流へ遷移する境界点でのレイノルズ数、 ν ：動粘性係数 ($=0.01\text{cm}^2/\text{s}$)、 d_s ：地盤の平均粒径 (cm)、 n ：地盤の間隙率である。一般に限界レイノルズ数 R_{ec} は 1～10 程度の値をとるといわれている。

地盤中の流れが乱流状態になると、ダルシーの法則が成立しなくなる。このような状況は長期的な地下水流動状況として望ましいものでなく、目詰まり発生の原因などになる。

(3) 両者を考慮した限界流速

設計で用いるべき限界流速 v_c は土粒子の移動に関する限界流速と層流から乱流へ遷移する限界流速のいずれか小さいほうの値である。土粒子移動に関する限界流速は粒径が大きくなる（透水係数が大きくなる）ほど大きくなる傾向を示し、層流から乱流への遷移に関する限界流速は粒径が大きくなるほど小さくなる傾向を示す。したがって、この両者を満足する限界流速（あるいは限界動水勾配）は透水係数との関係で示すと図 3.7.2 のようになる（高坂(2000 a)）。ただし、この図はいくつかの仮定条件（限界レイノルズ数：4、間隙率：0.4、土粒子の粒径と透水係数はグレーガーの関係を採用）のもとで計算された試算値である）。

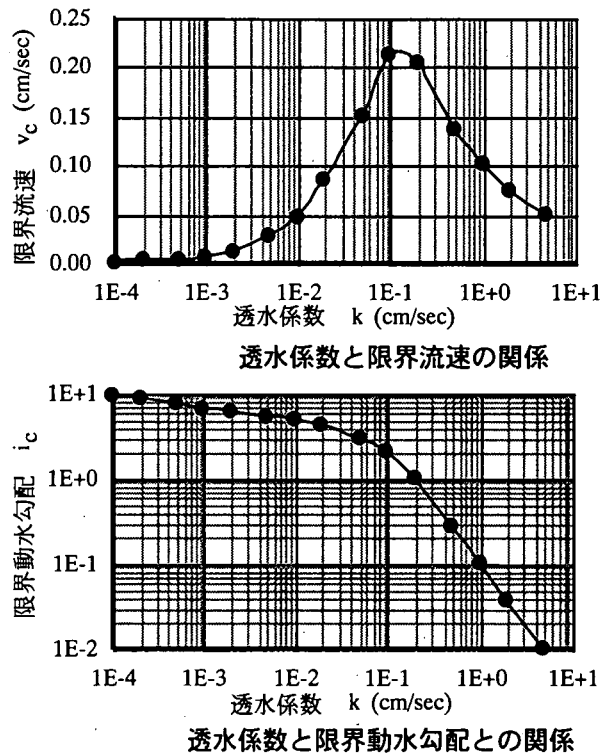


図 3.7.2 限界流速、限界動水勾配の試算結果

(4) 限界流速より決定される設置間隔

集水・涵養装置近傍における地盤中の流速および動水勾配が、限界流速 v_c および限界動水勾配 i_c 以下になるための集水・涵養装置の設置間隔 a_c は、式(3.7.2)により計算される。

$$a_c \leq \frac{A_w v_c}{q_l} = \frac{A_w v_c}{KDI} = \frac{A_w i_c}{DI} \quad (3.7.2a)$$

ここに、 A_w ：集水・涵養装置の流入・流出部の面積、 K ：帯水層の透水係数、 D ：帯水層

の厚さ、 I ：自然状態における地下水の動水勾配、 q_f ：自然状態での単位幅あたりの流量
さらに、帯水層全層にわたり施設がある場合、 $A_w = DB_w$ であるので、上式は次式に簡略化できる。

$$a_c \leq \frac{B_w i_c}{I} \quad (3.7.2b)$$

ここで、 B_w ：集水・涵養装置の流入・流出部の有効幅 ($B_w = A_w / D$)

(3.7.2b)式は自然状態における地下水の流速(あるいは動水勾配)が、集水・涵養装置近傍における流動面積の縮小割合だけ増大することを表した式であり、これが限界流速(あるいは限界動水勾配)を超えないように集水・涵養装置を設置することを意味する。

調査結果に基づく K , D , I と図 3.7.2 などから定められる v_c , i_c を用いれば、集水・涵養装置の大きさ (A_w , B_w など) を定めることにより限界流速に基づく設置間隔 a_c が決定できる。

3.7.2 数値計算

節 2.6 で数値計算の概要を示し、特に準三次元手法が影響評価での適用性が高いことを示し、適用例を紹介した。数値計算法は、後に示す簡易計算法のように対策工法毎に計算技法を変える必要はないなど、設計計算においても汎用性が高い。数値計算の適用に際する基本的な課題は項 2.6.4(1)に示しており、参照されたい。ここでは、設計計算において注意すべき特性を示す。

(1) 計算方法の変更

他の計算法も同様であるが、特にその信頼性に重きをおかれる数値計算法では、影響評価計算と対策工設計計算で同じ計算法を採用すべきである。

これは、検討する浸透次元や浸透挙動モデルの違いにより、対象地盤や対策工のモデル化手法が異なるため、結果が変わる可能性が少なくないからである。

影響評価時に低次元モデルで計算し対策工の設計では高次元モデルを適用する場合には、高次元モデルによる再度の影響評価を実施し、対策工の効果を評価する。

(2) 主な設備のモデル化

① 井戸など集水/涵養設備のモデル化

井戸など比較的小規模(全体の計算領域と比較して)な設備は、本来は相応の体積を有するようにモデル化すべきであるが、数値計算では解析モデルを小さくするために、計算モデルの分割節点や要素で代用することが多い。

この時、井戸径が明確でなく、そのサイズの違いによる効果が評価できていない場合がある。このような場合には、図 3.7.3 に示す有限要素節点に井戸条件を与えた場合の等価井戸半径と要素サイズの関係を用いればよい(Kono, 1973, 進士, 1998)。

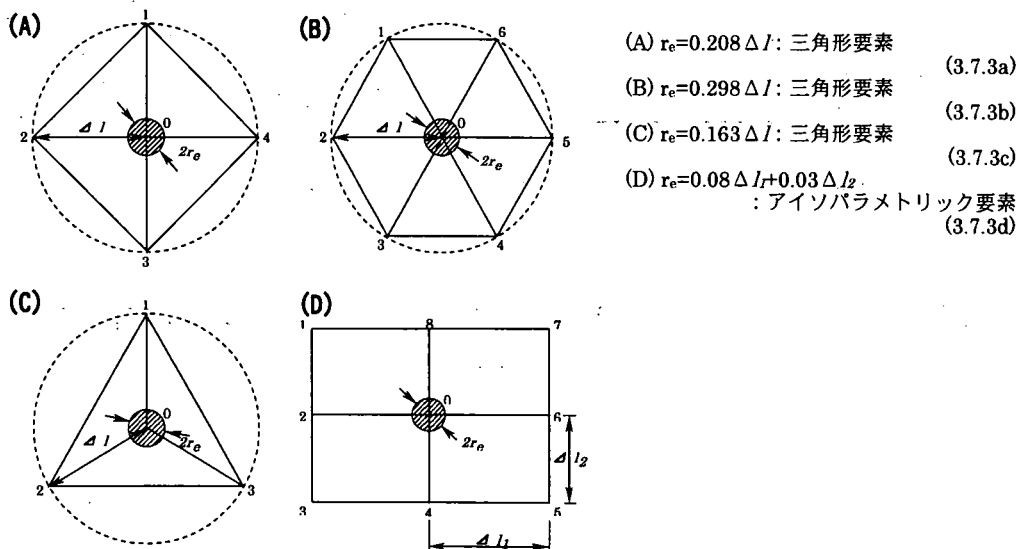


図 3.7.3 有限要素格子と等価井戸半径の関係

② 等価透水性の導入

集水/涵養設備を個々にモデル化せずに、遮水性構造物や集水/涵養設備を設置した周辺地盤が等価な透水性を有する材料に置き換えられたものとしてモデル化する方法がある。例えば、構造物は主たる帯水層を深さ方向に完全遮断し、その影響評価を二次元平面流場で表現できる場合に、対策工としての集水井戸は帯水層厚さ方向に部分的にしかストレーナーがない状態であったとする(図 3.7.4)。この時、井戸周辺の地下水流には鉛直方向成分がみられるため、二次元平面流場では検討できず、三次元流場を扱う必要がある。そこで、図 3.7.4 に示すように、井戸周辺地盤の透水係数を鉛直成分を考慮したものに修正する。具体的には、図 3.7.4 に示すように鉛直成分を考慮した本来の流れ状態を別の手法で計算し、この時の揚水流量と井戸内水位および周辺水位分布が等価となるよう修正透水係数ゾーン(図中着色部)の透水係数を逆算すればよい。このとき、本来の流れ状態の計算は対策施設 1 基の受け持つ領域をモデル化した小規模なモデルでよい。

また、一つのゾーニング(井戸周辺で修正する領域区分)だけでは比較すべき水位分布や井戸分担流量を表現できない場合には複数のゾーニングを検討すればよい。こうすることで、井戸周辺の流れを水平流れに置き換えることができ、三次元場でなくとも二次元平面場で評価できる。

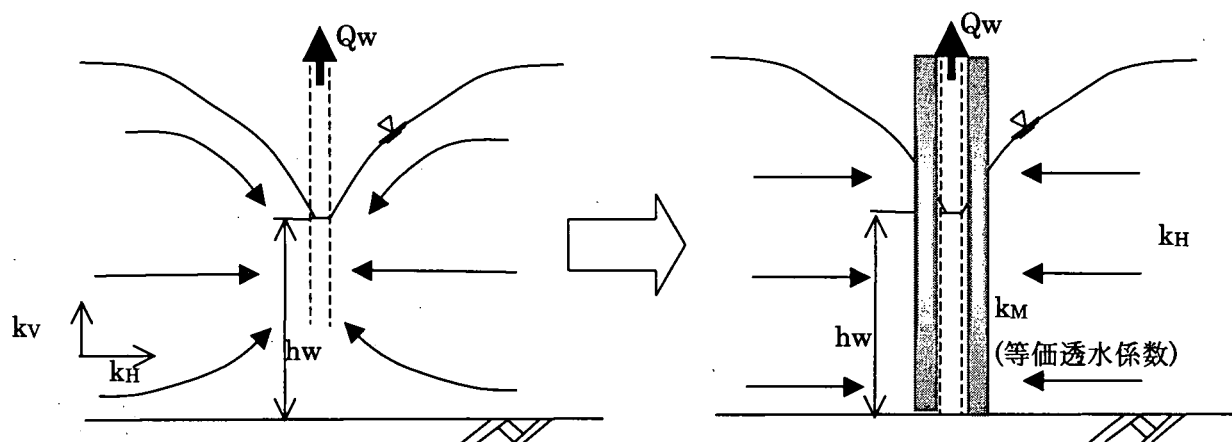


図 3.7.4 部分ストレーナー井戸の完全貫入井戸モデル化

数値計算の事例として土橋ら(1999)の検討結果を 2.6.1(1)で紹介したので参照されたい。

3.7.3 井戸型施設の計算法(1)

井戸理論を用いた計算法を紹介する(進士ら 1999)。この計算法は、影響評価の計算法の項(2.6.4.(3))で示した方法と同じ手法を用いたものであり、任意の井戸サイズ、井戸配置に対して対策効果を計算することができる。さらに、簡便のために同一の井戸仕様で構造物に近接配置した場合の効果をあらかじめノモグラム化しておき、これを用いて井戸型設備の計算ができるようにしたものである。

【解説】

図 3.7.5 に示すように、遮水性構造物は無限の延長を有するものと考え、モデル化領域は構造物を境に上流側あるいは下流側のいずれか 1/2 の領域である。つまり、影響圏境界では定水位境界、構造物部分では不透水境界となる 2 つの境界に挟まれた無限長の帯状モデルについて検討する。

対策工として、帯水層厚さに対し全層ストレーナを有する集水(あるいは涵養)井戸を構造物に沿って設置した状況を想定する。

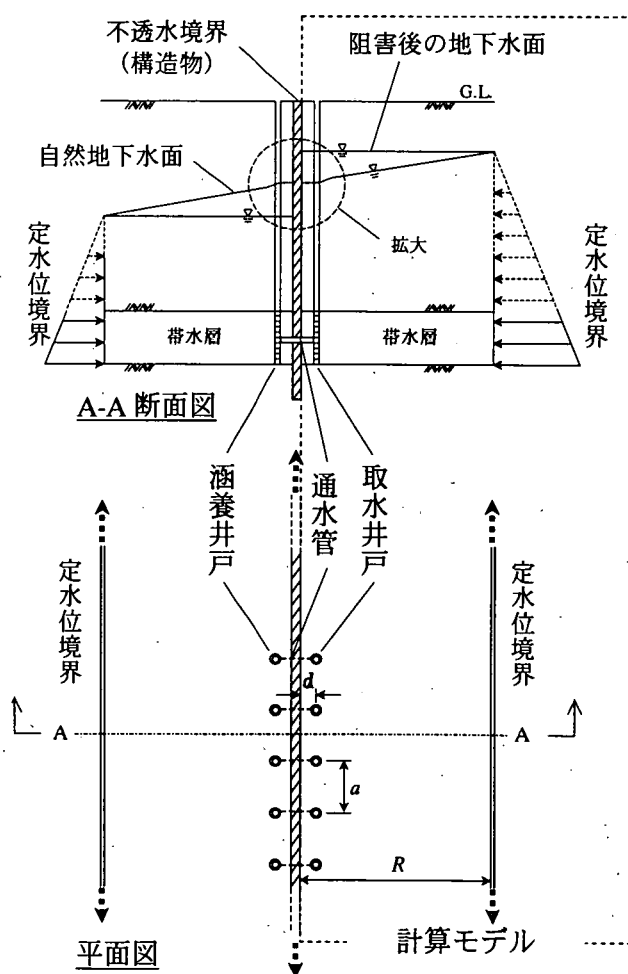


図 3.7.5 井戸理論による井戸型設備の計算モデル

これらの井戸の集水/涵養の条件は、図 3.7.6 に示すように一対の集水/涵養井戸間中央部の自然水位高さを井戸内の定水位条件とする。

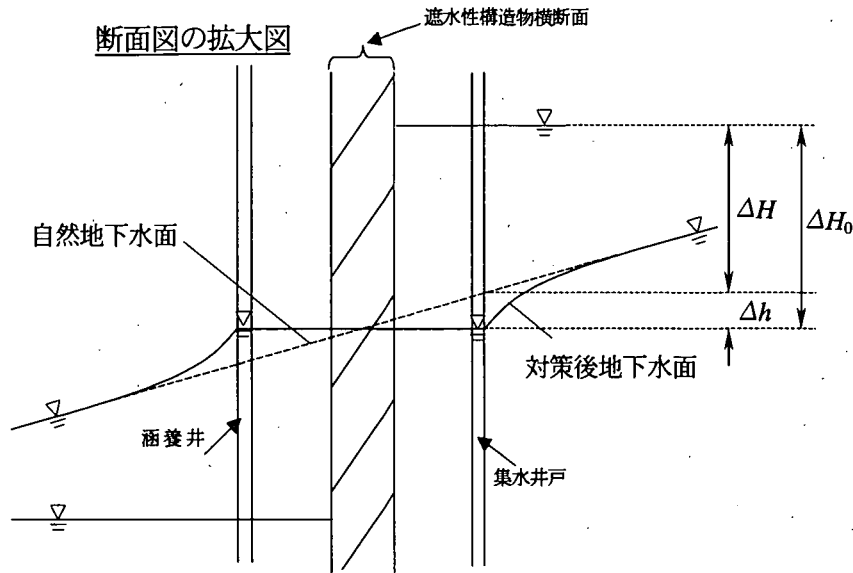


図 3.7.6 集水・涵養井戸の水位条件

これらの設定条件における計算理論は項(2.6.4.(3))に示した。実際の計算には計算プログラムの利用が必要である。このプログラムでは井戸毎に孔内水位、井戸径、井戸位置を任意に設定することができる。

ここでは、簡易計算として、井戸径 r_w 、井戸内水位低下量 ΔH (境界定水位を基準にしている) が同一なものとし、さらに構造物側面と井戸芯は井戸径相当の離隔を持ち ($d=r_w$)、一定配置ピッチ a としたときの計算結果をまとめた。この結果を、モノグラム図 3.7.7～9 および表 3.7.1～3 に示す。ここでは、以下のコラムに示した試算条件に則して、これらのノモグラム利用法を示す。

許容水位変動量)	: $S_{allow} = 2\text{m}$
(構造物延長中央部の井戸間位置	
自然動水勾配	: $I = 0.01$
影響圏距離	: $R = 1000\text{m}$
構造物全長	: $L_w = 1000\text{m}$ (半長: $L = 500\text{m}$)
自然地下水流向	: $\theta = 90^\circ$
帯水層透水係数	: $K = 1 \times 10^{-2} \text{cm/sec} (= 6 \times 10^{-3} \text{m/min})$
帯水層層厚	: $D = 10\text{m}$
構造物の幅 (半幅)	: $W = 10\text{m}$
構造物と集水・涵養施設との離れ	: $d = 0.2\text{m}$
集水・涵養施設の径	: $r_w = 0.2\text{m}$
集水・涵養施設のスクリーン長さ	: $l = 10\text{m}$
限界動水勾配	: $i_c = 5$ (図 3.7.2 より透水係数 $K = 1 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ に対する読み取りによる)

(1) 井戸条件の設定

施工可能な井戸条件から、井戸径 r_w 、井戸長 l を設定する。

ここで、井戸は完全貫入井戸と考え、井戸長 l は帯水層厚さ D に等しくとる。

(2) 集水井戸ピッチの設計

① 限界流速から評価される井戸ピッチ

集水流量に対する設計流量を限界流速 v_{CR} から評価する。

限界動水勾配 i_c に対する、限界流速は次式である。

$$\begin{aligned} v_{CR} &= K \cdot i_{CR} \quad (3.7.4) \\ &= 6 \times 10^{-3} \times 5 = 3 \times 10^{-2} (\text{m/min}) \end{aligned}$$

これより、集水井戸の設計限界流量は次式となる。

$$Q_{WCR} = 2 \pi r_w D v_{CR} f_s \quad (3.7.5)$$

ここで、 f_s は安全率とし、0.8 とした。

$$Q_{WCR} = 2 \times 3.14 \times 0.2 \times 10 \times 3 \times 10^{-2} \times 0.8 = 0.30 \text{ m}^3/\text{min}$$

設計限界流量の無次元量を以下の定義で計算する。

$$\overline{Q}_w = \frac{Q_{WCR}}{T \Delta H_0} \quad (3.7.6)$$

$$= 0.3 / (6 \times 10^{-3} \times 10 \times 10) = 0.5$$

ここで、 ΔH_0 は次式で求められる。

$$\begin{aligned} \Delta H_0 &= I \cdot R \quad (3.7.7) \\ &= 0.01 \times 1000 = 10 \text{ m} \end{aligned}$$

限界流量以下となる井戸ピッチの範囲をノモグラム、図 3.7.7 から求める。

$R/r_w = 1000/0.2 = 5000$ であるので、該当する曲線に着目し(該当する値の曲線がない場合は内挿による)、設計限界流量の無次元量 0.5 以下になる R/a を探索すると、 $R/a > 1.0$ である。

② 水位変動限界から評価されるピッチ

水位変動設計基準から、水位低下量 ΔH を次式で評価し、無次元量 $\Delta H / \Delta H_0$ を求め、これを満たす最大ピッチ a を求める。

$$\begin{aligned} \Delta H &= \Delta H_0 \cdot S_{allow} \quad (3.7.8) \\ &= 10 \cdot 2 = 8 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\Delta H / \Delta H_0 = 8 / 10 = 0.8$$

よって、設計値 $\Delta H / \Delta H_0 \geq 0.8$ を満たす条件は、図 3.7.8 から、 $R/a > 6.5$ である。

③動水勾配変動限界から評価されるピッチ

動水勾配変動設計基準から、無次元水位勾配量 \bar{I} を評価し、これを満たす最大ピッチ a を求める。このケーススタディでは設計基準を設定していないので、②の水位変動設計基準と同レベル条件値とし、次式を満たす条件を図 3.7.9 からさがす。

$$\bar{I} = \frac{RQ_w}{Ta\Delta H_0} \quad (3.7.9)$$

$$\geq 0.8$$

上記を満たす配置ピッチは、 $R/a > 5.5$ である。

④上記①～③で得られたそれぞれのピッチ a から最小値を最適ピッチ a とする。

最小設置ピッチとなるのは、②の $R/a=6.5$ の場合である。

よって、最適ピッチ a は $a=1000/6.5=154\text{m}$ となる。

⑤上記④で設定された最適ピッチ a が非現実的である場合には以下の変更を行い、①へ戻り、井戸サイズを再考する。

a が小さすぎる場合、井戸半径 r_w を大きくする。

a が大きすぎる場合、井戸半径 r_w を小さくする。

試算例では、延長 1000m に対して、集水井戸は 154m ピッチ (6.5 < 7 基設置) であり、施工可能とする。

(3) 涵養井戸ピッチの設計

集水井戸ピッチの検討手順と概ね同じもので評価できるが、異なる箇所のみ示す。

①限界流速から評価される井戸ピッチ

異なる点は設計限界涵養量の設定時用いる安全率である。一般の復水工法では、同じ地盤であっても限界揚水流量と限界注水流量が異なり、限界注水流量は限界揚水流量の 1/3 程度に設定することが多い。流動保全工法では各井戸が分担する流量が少ないため、集水井戸、涵養井戸とも限界流量に達することは少ないが、設計限界値にはこの概念を導入する。

ここでは、式(3.7.5)を用いて限界涵養流量を求めるが、集水井戸での安全率 $f_s=0.8$ を 1/3 に設定し、ここでは 0.26 とする。

$$\begin{aligned} Q_{wcr} &= 2\pi r_w D v_{cr} f_s \quad (3.7.5) \\ &= 2 \times 3.14 \times 0.2 \times 10 \times 3 \times 10^{-2} \times 0.26 = 0.10 \text{ m}^3/\text{min} \end{aligned}$$

設計限界流速の無次元量も以下の定義で計算する。

$$\overline{Q_w} = \frac{Q_{WCR}}{T\Delta H_0} \quad (3.7.6)$$

$$=0.1/(6 \times 10^{-3} \times 10 \times 10)=0.166$$

限界流量以下となる井戸ピッチ a をノモグラム、図 3.7.6、から求める。

$R/r_w=5000$ であるので、該当する曲線に着目し(該当する値の曲線がない場合は内挿による)、無次元流量 0.166 以下になる R/a を探索すると、 $R/a > 5.5$ である。

続く以下の項目についても集水井戸の計算と同じ手順である。ここで、試算計算例のように設計での限界条件や地盤条件が上・下流側で同じ場合には、以下の項目の計算結果は集水井戸と同じである。

②水位変動限界から評価されるピッチ a : $R/a > 6.5$

③動水勾配変動限界から評価されるピッチ a : $R/a > 5.5$

④上記①～③で得られたそれぞれのピッチ a から最小値を最適ピッチ a とする。

最小設置ピッチ a は $R/a=6.5$ の場合である。

よって、最適ピッチ a は $a=1000/6.5=154\text{m}$ となる。

⑤上記④で設定された最適ピッチ a が非現実的である場合には以下の変更を行い、①へ戻る。

a が小さすぎる場合、井戸半径 r_w を大きくする。

a が大きすぎる場合、井戸半径 r_w を小さくする。

試算例では、延長 1000m に対して、涵養井戸は 154m ピッチ ($6.5 < 7$ 基設置) であり、施工可能とする。

(4) 通水管の設計

① 通水管の分担通水流量の計算

(2)および(3)の検討結果から、集水井戸と涵養井戸の連結部を検討する。

まず、両井戸の分担流量を図 3.7.6 から求める。

試算例では、集水・涵養井戸ともに $R/a=6.5$ 、 $R/r_w=5000$ であるから、無次元流量は $\overline{Q_w}=0.14$ であり、分担流量は以下となる。

$$Q_w = T\Delta H_0 \overline{Q_w} \quad (3.7.10)$$

$$=6 \times 10^{-3} \times 10 \times 10 \times 0.14 = 0.084 \text{m}^3/\text{min} = 1.4 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{sec}$$

集水・涵養井戸の分担流量を比較して多いほうの分担流量を通水管 1 本あたりの分担通水量とする。集水・涵養井戸の連結を一对一で通水できない場合は、必要に応じて複数本を連結した通水管を検討する。

試算例では、一对一とする。

② 通水管径の設計

通水管内動水勾配 I_p を設定する。この項で紹介した計算方法では計算条件として集水・涵養井戸内では同一水位とした。ここでは通水を可能にする水位差を設定し、通水可能な動水勾配を決めなければならない。

ここでは、自然動水勾配の 1/10(試算例では通水管内動水勾配が 1/1000 となり、通水管両端部水位差 1cm に相当)を設計条件として与える。

試算例では、塩ビ管(粗度係数 0.01)を用い、マニング公式から必要管半径を計算した。

$$\begin{aligned} r &= [Q_w \times 2^{2/3} \times (n/\pi) / I_p^{1/2}]^{3/8} \quad (3.7.11) \\ &= [1.4 \times 10^{-3} \times 1.58 \times (0.01/3.14) / (0.001)^{1/2}]^{3/8} = 0.042\text{m} \\ \phi 8.5\text{cm} &< \phi 10\text{cm} \end{aligned}$$

(5) 試算例の検討結果の整理

設備名	半径	長さ	配置ピッチ	数量
集水井戸	0.2m	10m(帯水層厚相当)	154m	7 基
涵養井戸	0.2m	10m(帯水層厚相当)	154m	7 基
通水管	5cm	10m(構造物間)	154m	7 基

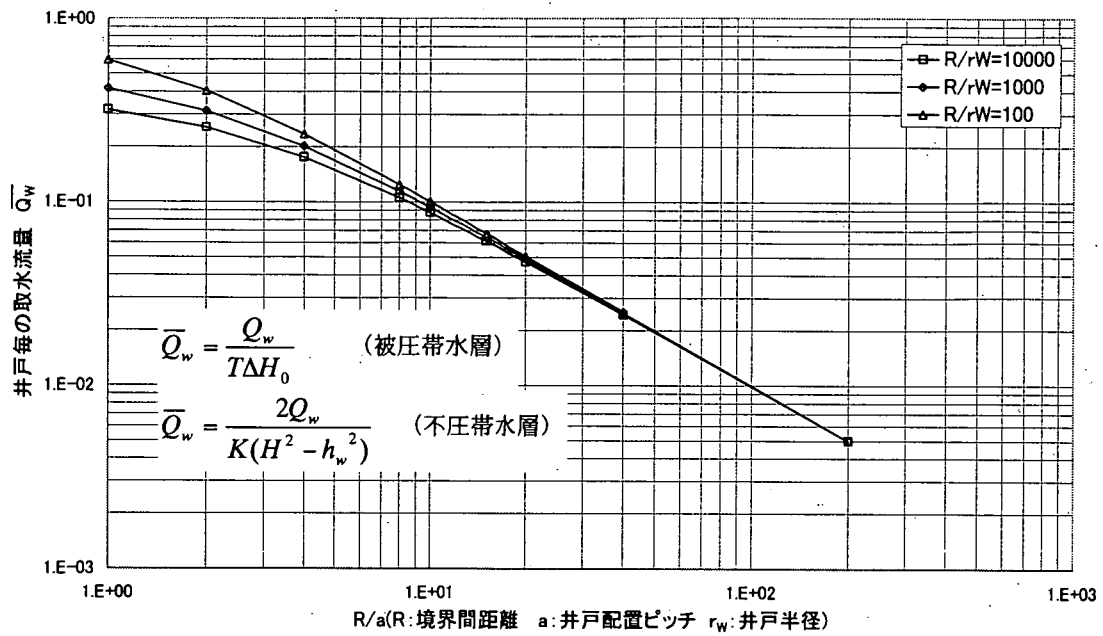


図3.7.7 中央配置井戸の揚水流量

表 3.7.1 中央設置井戸の取水流量の数表

	$\overline{Q_w}$		
R/a	$R/r_w=100$	$R/r_w=1000$	$R/r_w=10000$
1.00E+00	5.95E-01	4.16E-01	3.18E-01
2.00E+00	4.05E-01	3.14E-01	2.55E-01
4.00E+00	2.35E-01	2.02E-01	1.76E-01
8.00E+00	1.25E-01	1.15E-01	1.06E-01
1.00E+01	1.01E-01	9.35E-02	8.78E-02
1.50E+01	6.74E-02	6.45E-02	6.15E-02
2.00E+01	5.08E-02	4.89E-02	4.73E-02
4.00E+01	2.54E-02	2.49E-02	2.45E-02
2.00E+02	—	5.00E-03	5.00E-03

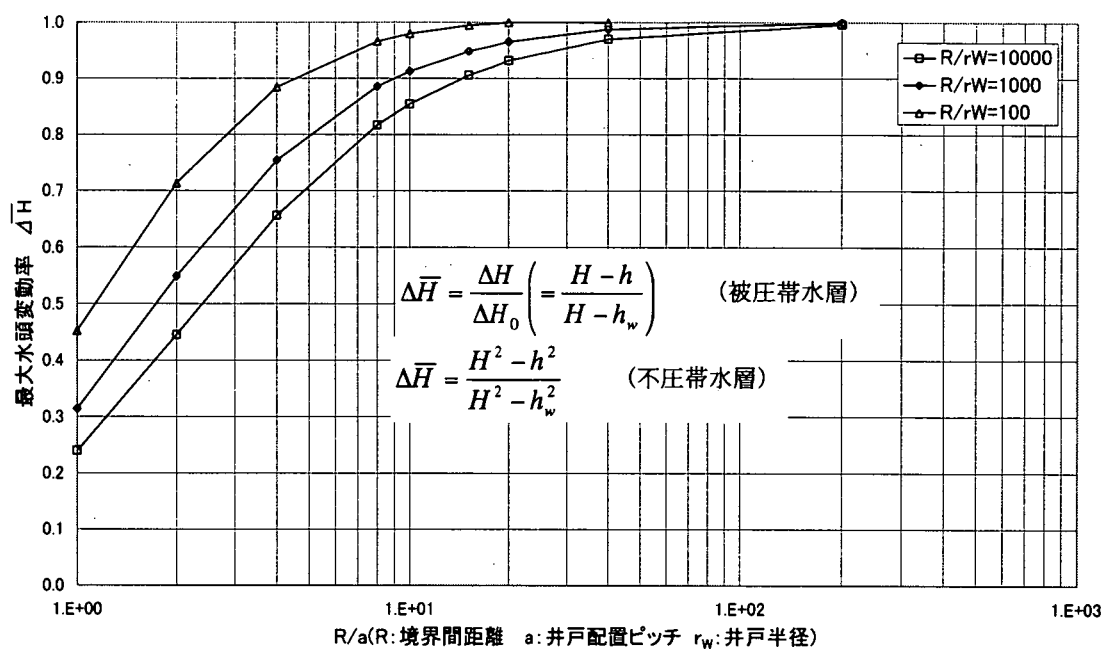


図 3.7.8 中央近傍配置井戸間の水位変動量

表 3.7.2 井戸間中央部の水位低下分布の数表

R/a	$\Delta \bar{H}$		
	$R/r_w = 100$	$R/r_w = 1000$	$R/r_w = 10000$
1.00E+00	4.53E-01	3.14E-01	2.40E-01
2.00E+00	7.14E-01	5.49E-01	4.45E-01
4.00E+00	8.85E-01	7.55E-01	6.57E-01
8.00E+00	9.66E-01	8.86E-01	8.17E-01
1.00E+01	9.80E-01	9.13E-01	8.54E-01
1.50E+01	9.95E-01	9.49E-01	9.06E-01
2.00E+01	1.00E+00	9.66E-01	9.32E-01
4.00E+01	1.00E+00	9.88E-01	9.70E-01
2.00E+02	—	1.00E+00	9.96E-01

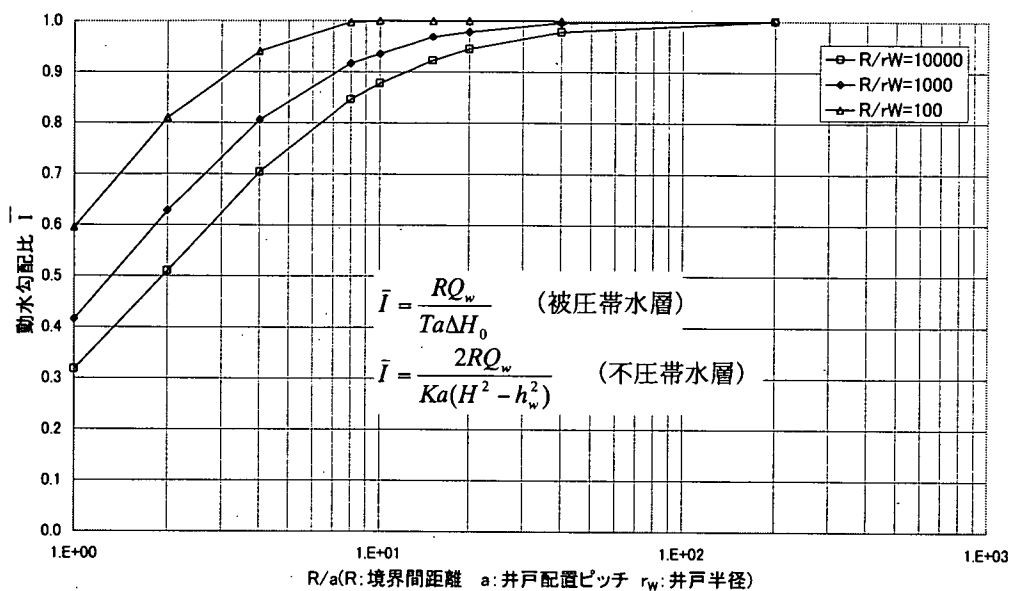


図 3.7.9 中央配置井戸の動水勾配変動量

表 3.7.3 動水勾配回復率の数表

	\bar{I}		
R/a	$R/r_w = 100$	$R/r_w = 1000$	$R/r_w = 10000$
1.00E+00	5.95E-01	4.16E-01	3.18E-01
2.00E+00	8.10E-01	6.28E-01	5.10E-01
4.00E+00	9.40E-01	8.06E-01	7.04E-01
8.00E+00	9.97E-01	9.16E-01	8.46E-01
1.00E+01	1.00E+00	9.35E-01	8.78E-01
1.50E+01	1.00E+00	9.68E-01	9.23E-01
2.00E+01	1.00E+00	9.78E-01	9.45E-01
4.00E+01	1.00E+00	9.96E-01	9.78E-01
2.00E+02	—	1.00E+00	1.00E+00

3.7.4 井戸型施設の計算法 (2)

井戸型の集水・涵養施設を用いた地下水流動保全工法の設置間隔設計法 (2) は、図 3.7.10 のフローに従う。

【解説】

高坂 (1999) により提案されたこの設計法は、構造物建設時の水位変動量を許容水位変動量内におさめるための必要通水量を算定し、この必要通水量を得るための集水・涵養施設の設置間隔を繰り返し計算により求めるものである。図 3.7.10 に示すフローに従いこの手順を概説する。

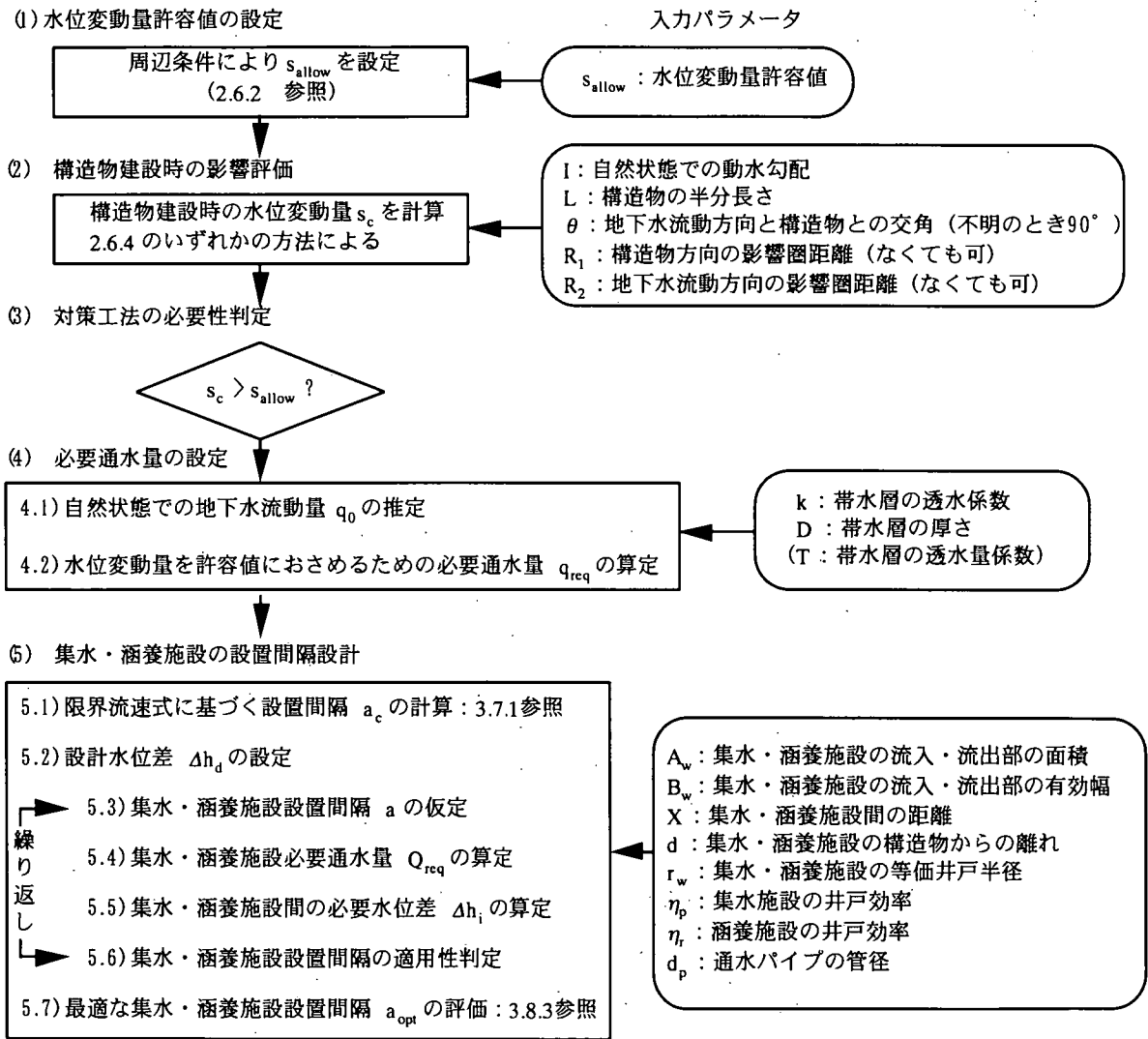


図 3.7.10 井戸型の集水・涵養施設を用いた地下水流動保全工法の設計フロー

(1) 水位変動量許容値の設定

2.6.2 に示す考え方にしたがって水位変動量の許容値 s_{allow} を設定する。

(2) 構造物建設時の影響評価

2.6.4 に示すいずれかの手法により構造物建設時の水位変動量 s_c を予測する。

(3) 対策工法の必要性判定

(1)で設定した許容水位変動量と(2)で計算した水位変動量予測値の大小関係を比較して対策工法の必要性を判定する。

(4) 必要通水量の設定

水位変動量を許容水位変動量内におさめるための必要通水量を計算する。

4.1) 自然状態での地下水流動量 q_0 の推定

構造物建設前の自然状態における地下水流動量を次式により算定する。

$$q_0 = TI = KDI \quad (3.7.12)$$

ここに、 q_0 ：自然状態における地下水流動量（単位長さあたり）、

T ：地盤の透水量係数 ($T=KD$)、 K ：地盤の透水係数、 D ：帯水層の厚さ。

4.2) 水位変動量を許容値におさめるための必要通水量 q_{req} の設定

対策工法設置時の水位変動量を許容水位変動量内におさめるための必要通水量を次式により算定する。

$$q_{req} = \left(1 - \frac{s_{allow}}{s_c}\right) q_0 = \left(1 - \frac{s_{allow}}{s_c}\right) TI \quad (3.7.13)$$

ここに、 q_{req} ：対策工法に要求される構造物単位長さあたりの必要通水量。

(5) 必要通水量を得るための集水・涵養施設設置間隔設計

集水・涵養施設設置間隔 a を図 3.7.11 のフローにしたがい設定する。

5.1) 限界流速式に基づく最大設置間隔 a_c の計算

集水・涵養施設の近傍における流速が限界流速を超えないような集水・涵養施設の設置間隔 a_c を 3.7.1 に示す手法により設定する。以下ではこれより小さい範囲の設置間隔について検討を行う。

5.2) 設計水位差 Δh_d の設定

自然状態における集水・涵養施設間の水位差に上流側、下流側それぞれの許容水位変動量を考慮して許容水位差を求め、これから設計上見込む余裕水位差を差し引いて設計水位

差を設定する。

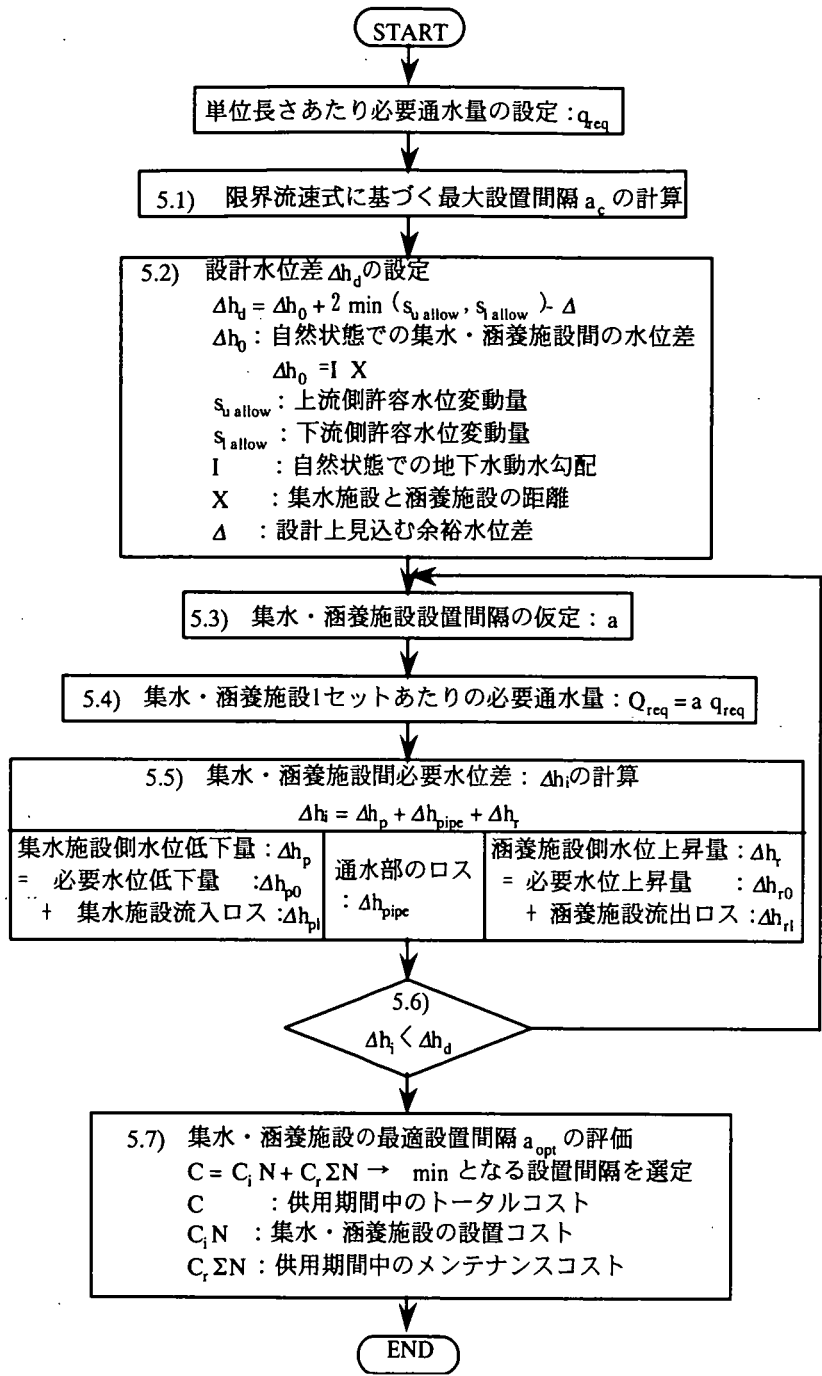


図 3.7.11 集水・涵養施設の設置間隔設計フロー

(a) 自然状態での集水～涵養施設間の水位差 Δh_0 の計算

自然状態での集水～涵養施設間の水位差を次式により計算する。

$$\Delta h_0 = IX \quad (3.7.14)$$

ここに、 I ：自然動水勾配、 X ：集水～涵養施設間の距離。

(b) 集水～涵養施設間の許容水位差 Δh_{limit} の計算

自然状態での集水～涵養施設間の水位差に上流側および下流側許容水位変動量 s_{allow} を加えて集水～涵養施設間の許容水位差を計算する。

$$\Delta h_{limit} = \Delta h_0 + 2 \min(s_{u\ allow}, s_{l\ allow}) \Rightarrow \Delta h_0 + 2s_{allow} \quad (3.7.15)$$

ここに、 $s_{u\ allow}$ ：上流側許容水位変動量、 $s_{l\ allow}$ ：下流側許容水位変動量、 $s_{allow} = \min(s_{u\ allow}, s_{l\ allow})$

(c) 余裕水位差 Δ を考慮した設計水位差 Δh_d の設定

集水～涵養施設間の設計水位差として、許容水位差に余裕水位差を見込んだ値を用いる。

$$\Delta h_d = \Delta h_{limit} - \Delta \quad (3.7.16)$$

ここに、 Δ ：余裕水位差。この余裕水位差は目詰まりなどによる能力低下分に相当するものである。

5.3) 集水・涵養施設設置間隔 a の仮定

限界流速から決定される集水・涵養施設設置間隔 a_c 以下の範囲で集水・涵養施設設置間隔 a を仮定する。仮定した何通りかの設置間隔に対し、5.3)～5.6)の計算手順を繰り返すことにより集水・涵養施設設置間隔としての適合性を判定する。

5.4) 集水・涵養施設の必要通水量 Q_{req} の算定

仮定した集水・涵養施設の設置間隔と 4.2)で求めた必要通水量から、集水・涵養施設 1 セットあたりの必要通水量を次式により算定する。

$$Q_{req} = a q_{req} \quad (3.7.17)$$

5.5) 集水・涵養施設間の必要水位差 Δh_i の算定

以下(a)～(c)で計算する各要素を足し合わせて、必要通水量を通水するための集水・涵養施設間必要水位差 Δh_i を計算する。

$$\begin{aligned} \Delta h_i &= \Delta h_p + \Delta h_{pipe} + \Delta h_r \\ &= (\Delta h_{p0} + \Delta h_{pl}) + \Delta h_{pipe} + (\Delta h_{r0} + \Delta h_{rl}) \end{aligned} \quad (3.7.18)$$

ここに、 Δh_p ：集水施設側必要水位低下量、 Δh_{pipe} ：通水部のロス（パイプロス）、 Δh_r ：涵養施設側必要水位上昇量、 Δh_{p0} ：集水に必要な水位低下量、 Δh_{r0} ：涵養に必要な水位上昇

量、 Δh_{pl} ：集水施設近傍における井戸ロス、 Δh_{rl} ：涵養施設近傍における井戸ロス。

(a) 井戸理論式に基づく必要水位変動量 Δh_{p0} 、 Δh_{r0} の計算

集水に必要な水位低下量および涵養に必要な水位上昇量は定常井戸理論式を準用して、以下のいずれかの式により算定する。基本的に集水側の水位低下量と涵養側の水位上昇量は一致する。

・ 構造物から離れ d で集水・涵養施設を設置した場合 ($d \neq 0$)

$$\Delta h_{p0} = \Delta h_{r0} = s_w = \frac{Q_{req}}{2\pi T} \ln \left(\frac{R^2}{2d r_w} \right) \quad (3.7.19)$$

・ 構造物に接して集水・涵養施設を設置した場合 ($d=0$)

$$\Delta h_{p0} = \Delta h_{r0} = s_w = \frac{Q_{req}}{\pi T} \ln \left(\frac{R'}{r_w} \right) \quad (3.7.20)$$

ここに、 d ：構造物と集水・涵養施設の離れ、 s_w ：必要通水量を通水したときの集水・涵養施設水位変動量、 R ：設置間隔 a で集水・涵養施設を設置したときの見掛けの影響圏半径（これまでの検討結果では $R=0.15a$ ）、 r_w ：集水・涵養施設の等価半径。

(b) 集水・涵養施設の井戸ロス Δh_{pl} 、 Δh_{rl} の計算

初期の目詰まりなどによる井戸ロスを井戸効率により評価する。

・ 集水施設側の井戸ロスについて

$$\Delta h_{pl} = \left(\frac{1}{\eta_p} - 1 \right) \frac{Q_{req}}{2\pi T} \ln \left(\frac{R'}{r_w} \right) \quad (3.7.21)$$

・ 涵養施設側の井戸ロスについて

$$\Delta h_{rl} = \left(\frac{1}{\eta_r} - 1 \right) \frac{Q_{req}}{2\pi T} \ln \left(\frac{R'}{r_w} \right) \quad (3.7.22)$$

ここに、 η_p ：集水施設の井戸効率、 η_r ：排水施設の井戸効率。

(c) 通水部のロス（通水パイプの配管ロス） Δh_{pipe} の計算

通水部のロスは 3.7.8 に示すいずれかの方法、あるいは以下に示す損失水頭計算式により算出する。

$$\Delta h_{pipe} = \lambda \frac{X}{D_p} \frac{v_p^2}{2g} \quad (3.7.23)$$

ここに、 X ：通水部の長さ、 λ ：管摩擦係数（ここでは、(3.7.24)式に示すダルシーの式（機械工学便覧 1968）を用いる）、 D_p ：通水パイプの径、 v_p ：通水部の流速(m/sec)、 g ：重力加速度(m/sec²)。

$$\lambda = \frac{1}{1000} \left(20 + \frac{1}{2D_p} \right) \quad (3.7.24)$$

5.6) 可能な集水・涵養施設設置間隔の評価

(3.7.16)式で計算される設計水位差 Δh_d と(3.7.18)式で計算される必要水位差 Δh_i の比較により、仮定した集水・涵養施設設置間隔 a が適用可能かどうかを判定する。

集水・涵養施設設置間隔 a が適用可能であるための条件

$$\Delta h_d \geq \Delta h_i \quad (3.7.25)$$

5.7) 最適な集水・涵養施設設置間隔の評価

3.8.3 で述べる長期的な目詰まりによるメンテナンスコストを評価し、5.6)で求めた適用可能な集水・涵養施設設置間隔の中からライフサイクルコストが最小となるような最適設置間隔を決定する。

本手法で設計に必要な入力パラメータは図 3.7.10 に示すとおりであるが、地盤調査により求めるべきパラメータは、 I, R_1, R_2, K, D 程度と非常に少ない。

【計算例】

3.7.3 井戸型設備の計算法(1) で示した計算例と同様の条件下での、本手法の計算例を以下に示す。

■計算条件

許容水位変動量	: $s_{allow} = 2\text{m}$
自然動水勾配	: $I = 0.01$
構造物全長	: $L_w = 1000\text{m}$ (半長: $L = 500\text{m}$)
自然地下水流向	: $\theta = 90^\circ$
帯水層透水係数	: $K = 1 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ ($= 6 \times 10^{-3} \text{m/min}$)
帯水層層厚	: $D = 10\text{m}$
構造物の幅 (半幅)	: $W = 10\text{m}$
構造物と集水・涵養施設との離れ	: $d = 0.2\text{m}$
集水・涵養施設の径	: $r_w = 0.2\text{m}$
集水・涵養施設のスクリーン長さ	: $l = 10\text{m}$
通水パイプの径	: $D_p = 0.1\text{m}$

(1) 水位変動量許容値の設定

設計条件より、 $s_{allow} = 2\text{m}$ とする。

(2) 構造物建設時の影響評価

2.6.4 (2.6.10)式を用いる。

$$s_c = IL \sin \theta = 0.01 \times 500 \times \sin 90^\circ = 5\text{m}$$

構造物の建設により 5m 程度の水位変化が予想される。

(3) 対策工の必要性判定

$s_c > s_{allow}$ であり、対策工が必要と判定。

(4) 必要通水量の設定

4.1) 自然状態での地下水流動量 q_0 の推定

(3.7.12)式より、

$$q_0 = kDI = 6 \times 10^{-3} \times 10 \times 0.01 = 6 \times 10^{-4} \text{m}^2 / \text{min}$$

4.2) 水位変動量を許容値におさめるための必要通水量 q_{req} の設定

(3.7.13)式より、

$$q_{req} = \left(1 - \frac{s_{allow}}{s_c}\right) q_0 = \left(1 - \frac{2.0}{5.0}\right) \times 6 \times 10^{-4} = 3.6 \times 10^{-4} \text{m}^2 / \text{min}$$

(5) 必要通水量を得るための集水・涵養施設設置間隔設計

5.1) 限界流速式に基づく最大設置間隔 a_c の計算

集水・涵養装置のスクリーン面積は、井戸径およびスクリーン長さより、

$$A_w = 2\pi r_w l = 2\pi \times 0.2 \times 10 = 12.6\text{m}^2$$

また、図 3.7.2 より透水係数 $K = 1 \times 10^{-2}\text{cm/sec}$ に対する限界動水勾配として $i_c = 5$ 程度が読み取れるので、最大設置間隔は(3.7.2)式より

$$a_c = \frac{A_w i_c}{DI} = \frac{12.6 \times 5}{10 \times 0.01} = 630\text{m}$$

5.2) 設計水位差 Δh_d の設定

(a) 自然状態での集水～涵養施設間の水位差 Δh_0 の計算

自然状態での集水～涵養施設間の水位差は(3.7.14)式より、

$$\Delta h_0 = IX = I \cdot 2(W + d) = 0.01 \times 2 \times (10 + 0.2) = 0.2\text{m}$$

(b) 集水～涵養施設間の許容水位差 Δh_{limit} の計算

上流側および下流側許容水位変動量は $s_{allow} = 2.0\text{m}$ であるから、集水～涵養施設間の許容水位差は(3.7.15)式より、

$$\Delta h_{limit} = \Delta h_0 + 2s_{allow} = 0.2 + 2 \times 2.0 = 4.2\text{m}$$

(c) 余裕水位差 Δ を考慮した設計水位差 Δh_d の設定

集水～涵養施設間の設計水位差 Δ として 1.0m を見込む。許容水位差 Δh_d は(3.7.16)式より、

$$\Delta h_d = \Delta h_{limit} - \Delta = 4.2 - 1.0 = 3.2\text{m}$$

5.3) 集水・涵養施設設置間隔 a の仮定

集水・涵養施設設置間隔 a を仮定し、5.3)～5.6)の計算手順を繰り返す。一例として $a = 100\text{m}$ の場合の計算例を示す。

5.4) 集水・涵養施設の必要通水量 Q_{req} の算定

集水・涵養施設 1 セットあたりの必要通水量は(3.7.17)式により、

$$Q_{req} = a q_{req} = 100 \times 3.6 \times 10^{-4} = 3.6 \times 10^{-2} \text{m}^3 / \text{min}$$

5.5) 集水・涵養施設間の必要水位差 Δh_i の算定

(a) 井戸理論式に基づく必要水位変動量 Δh_{p0} , Δh_{r0} の計算

集水に必要な水位低下量および涵養に必要な水位上昇量は(3.7.19)式より、

$$\Delta h_{p0} = \Delta h_{r0} = s_w = \frac{Q_{req}}{2\pi T} \ln \left(\frac{R^2}{2d r_w} \right) = \frac{3.6 \times 10^{-2}}{2\pi \times 6.0 \times 10^{-3} \times 10} \ln \left(\frac{(0.15 \times 100)^2}{2 \times 0.2 \times 0.2} \right) = 0.76\text{m}$$

b) 集水・涵養施設の井戸ロス Δh_{pl} , Δh_{rl} の計算

井戸効率 $\eta_p = \eta_r = 1.0$ とする。(3.7.21)式および(3.7.22)式より、

$$\Delta h_{pl} = \Delta h_{rl} = 0$$

(c) 通水部のロス（通水パイプの配管ロス） Δh_{pipe} の計算

管摩擦係数は、(3.7.24)式より、

$$\lambda = \frac{1}{1000} \left(20 + \frac{1}{2D_p} \right) = \frac{1}{1000} \left(20 + \frac{1}{2 \times 0.1} \right) = 0.025$$

必要通水量 $Q_{req}=3.6 \times 10^{-2} \text{m}^3/\text{min}$ に対する管内流速は、 $v_p = 0.076 \text{m/sec}$ 。

したがって、通水部のロスは(3.7.23)式より、

$$\Delta h_{pipe} = \lambda \frac{X}{D_p} \frac{v_p^2}{2g} = 0.025 \times \frac{20.4 \times 0.076^2}{0.1 \times 2 \times 9.8} = 0.0015 \text{m}$$

と微小な値である。

集水・涵養施設間必要水位差 Δh_i は (3.7.18)式より、

$$\begin{aligned} \Delta h_i &= \Delta h_p + \Delta h_{pipe} + \Delta h_r \\ &= (\Delta h_{p0} + \Delta h_{pl}) + \Delta h_{pipe} + (\Delta h_{r0} + \Delta h_{rl}) \\ &= (0.76 + 0) + 0.0015 + (0.76 + 0) = 1.52 \text{m} \end{aligned}$$

5.6) 可能な集水・涵養施設設置間隔の評価

集水・涵養施設設置間隔 a の適用性判定式(3.7.25)より、

$$\Delta h_d \geq \Delta h_i \Rightarrow 3.2 > 1.52 \Rightarrow \text{O.K.}$$

この手順をいくつかの設置間隔の値について繰り返すと図 3.7.12 のような結果が得られ、最大設置可能間隔 $a_{max} = 180 \text{m}$ が得られる。

5.7) 最適な集水・涵養施設設置間隔の評価

3.8.3 に示す考え方にしたが、 $a < 180 \text{m}$ の範囲でライフサイクルコストが最小となるような最適設置間隔を決定する。

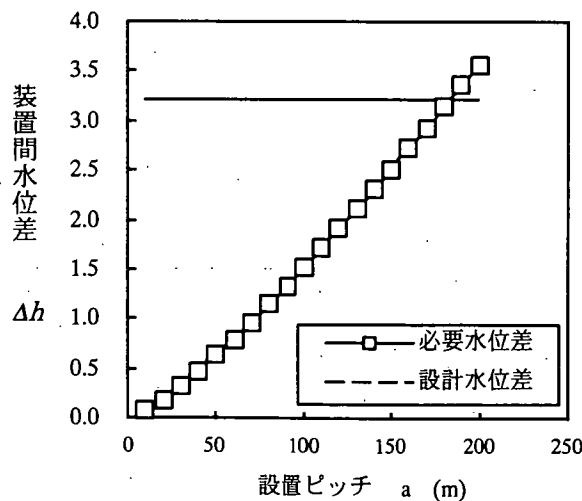


図 3.7.12 設置間隔による水位差変化の計算結果

3.7.5 集水涵養機能付壁施設

遮水壁の外面にストレーナ仕上げのスリット構造を持たせたものである。

このような施設による対策効果の予測を簡易計算で行うには、前出の井戸型設備の計算法(1)および(2)を用いることができる。集水涵養機能付壁施設にこれらの計算法を適用するためには、ストレーナ幅を等価な井戸半径に置き換える必要がある。

基本的には、ストレーナ部と等価な面積をもつ井戸に置き換える手法を用いる。

例えば、幅 B_w 、長さ l の集水・涵養部があった場合、その面積は $B_w l$ となるが、深度方向の集水・涵養部の長さ l は集水涵養機能付壁施設でも同じものを用いる。これは、地下水の流れ状況をできるだけ変更しないようにするためである。

よって、幅 B_w と等価な周辺長をもつ井戸として等価井戸半径 r_{we} は次式で算定できる。

$$r_{we} = \frac{B_w}{2\pi} \quad (3.7.26)$$

3.7.6 水平・斜めボーリング施設（集水／涵養ボーリング対策モデル）

ボーリング対策モデルは基本的な検討方法は先述の井戸モデルと同様である。

しかし、ボーリング施設の設置方向が水平方向あるいはいくらかの勾配を有する斜め方向となることから、前出の鉛直方向の井戸と等価なモデルを適用することができない。また、ボーリング孔周辺では鉛直方向流れが卓越することから、数値解析法を用いる場合にも三次元場での検討が必要となる。三次元解析による数値実験結果をまとめ、設計に用いたケーススタディが高坂ら(2000 b)によってなされているので参考になるだろう。

進士ら(2000)は理論解を用いてこの問題の簡易計算法を示した。ここでは、この方法について簡単に説明する。

(1) 基本公式

三次元的に無限の広がりを持つ均質等方透水性帯水層内で無限小点に一定流量 $q[L^3/T]$ のインパクトを与えた時の定常水頭変動公式を基本公式とする(西垣, 1986)。

$$s = \frac{q}{4\pi K r} \quad (3.7.27)$$

ここで、 $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ 、 (x, y, z) はインパクトを与えた点を原点とする任意点座標

さらに、ボーリング孔のストレーナ設置区間および設置方向にわたって一定流量 q のインパクト点が連続に無限数配置された場合の重ね合わせ理論を適用すると以下の積分式になる。

$$\begin{aligned} s &= \frac{Q}{4\pi K L} \int_{-L/2}^{L/2} \frac{d\zeta}{r} \\ &= \frac{Q}{4\pi K L} \int_{-L/2}^{L/2} \frac{d\zeta}{\sqrt{(\overline{OP} \cos \theta - \zeta)^2 + \rho^2}} = \frac{Q}{4\pi K L} \int_{-L/2}^{L/2} \frac{d\zeta}{\sqrt{(\overline{OP} \cos \theta - \zeta)^2 + (\overline{OP} \sin \theta)^2}} \\ &= \frac{Q}{4\pi K L} \left[\sinh^{-1} \frac{\overline{OP} \cos \theta + L/2}{\overline{OP} \sin \theta} - \sinh^{-1} \frac{\overline{OP} \cos \theta - L/2}{\overline{OP} \sin \theta} \right] \\ &= \frac{Q}{4\pi K L} \left[\ln \left(\frac{\overline{OP} \cos \theta + L/2}{\overline{OP} \sin \theta} + \sqrt{\left(\frac{\overline{OP} \cos \theta + L/2}{\overline{OP} \sin \theta} \right)^2 + 1} \right) - \ln \left(\frac{\overline{OP} \cos \theta - L/2}{\overline{OP} \sin \theta} + \sqrt{\left(\frac{\overline{OP} \cos \theta - L/2}{\overline{OP} \sin \theta} \right)^2 + 1} \right) \right] \end{aligned} \quad (3.7.28)$$

この公式は、ボーリング孔が直交 x, y, z 軸方向に対して任意の角度を有して設置された場合が考慮でき、図 3.7.13 にその諸元を示す。

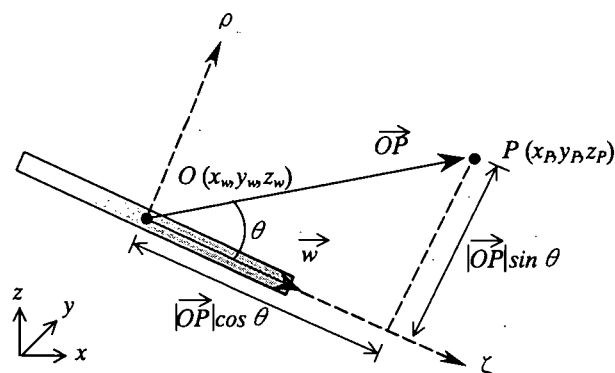


図 3.7.13 ボーリング孔ストレーナ配置と座標軸

ここで, L :ストレーナ長, Q :総インパクト, K :透水係数[L/T], ζ :ストレーナ軸方向座標[L], ρ :ストレーナ軸直交半径方向座標[L], (x, y, z) :直交三次元座標系, s :水位低下量[L], (ζ, ρ) 座標軸原点は井戸中央座標 $O(x_w, y_w, z_w)$, $\overline{OP} = (x_P - x_w, y_P - y_w, z_P - z_w)$, $\sin \theta = \sqrt{1 - \cos^2 \theta}$,

$$\cos \theta = \frac{\overline{OP} \cdot \vec{w}}{|\overline{OP}| |\vec{w}|}, \quad q = Q \cdot d\zeta / L$$

(2) 不透水層に挟まれた被圧帯水層での
計算法

式(3.7.28)は無限に広がる領域内のボーリング孔を扱っているため、不透水層に挟まれた被圧帯水層では図 3.7.14 に示すように上下の境界の影響を考慮する必要がある。実帯水層は図中着色部分であり、それ以外は境界を表すために用いた鏡像井戸の位置を表している。

3.7.3 で示したように複数の水理境界に対して鏡像重ね合わせを適用する場合には、無限数の鏡像井戸の影響を考慮する必要があるが、適切な基準値の導入により、収束計算を行う。

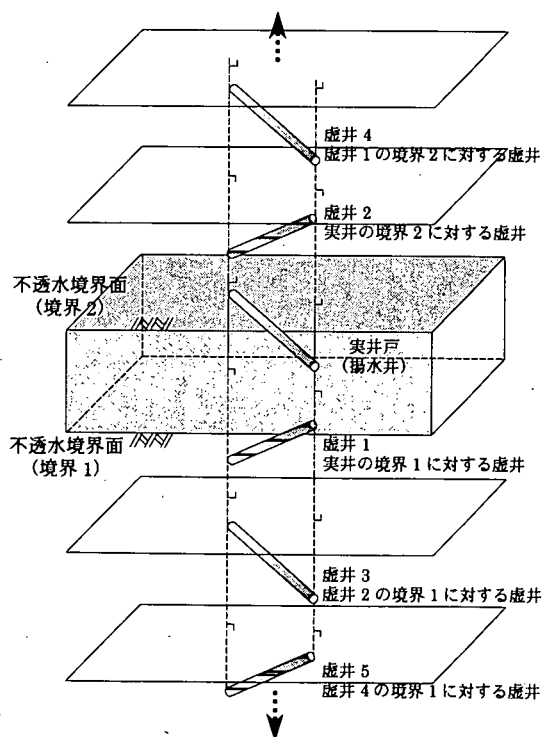


図 3.7.14 不透水境界間のボーリング孔集水モデル

(3) 複数ボーリング設置の考慮

さらに、複数のボーリング孔の集水・涵養効果を評価する必要があるが、ここでも 3.7.3 で用いた井戸干渉を考慮した計算法を導入する。

計算にあたっては計算プログラムを用いる。3.7.3 では、井戸型設備の対策工についてノモグラムを作成したが、水平・斜めボーリング孔ではボーリング長、径、設置角度などが現地状況によって異なる上、同じ現場でも同一の仕様で設置することも困難な場合が多いため一般化が難しく、現時点ではノモグラムの作成は行っていない。

3.7.7 面型の集水・涵養装置の設計

面型の集水・涵養装置については、

- ・フィルター層設置間隔： a
- ・フィルター層設置幅： b
- ・フィルター層透水係数： K_f
- ・フィルター層厚さ： d
- ・フィルター層設置深度： z

などの項目について設計を行う。

【解説】

集水・涵養装置として、透水性の高い材料を土留め壁に面状に設置した対策であり、井戸型やパイプ型の線状の集水・涵養装置と比較すると、集中流を生じないため目詰まりの懸念が少ない。この工法は、井戸型やパイプ型の工法が適用し難い低透水性の地盤に向いた工法ともいえる。土留め壁を撤去する方式もこの一形態といえる。

面型集水・涵養装置の概要を図 3.7.15 に示す。

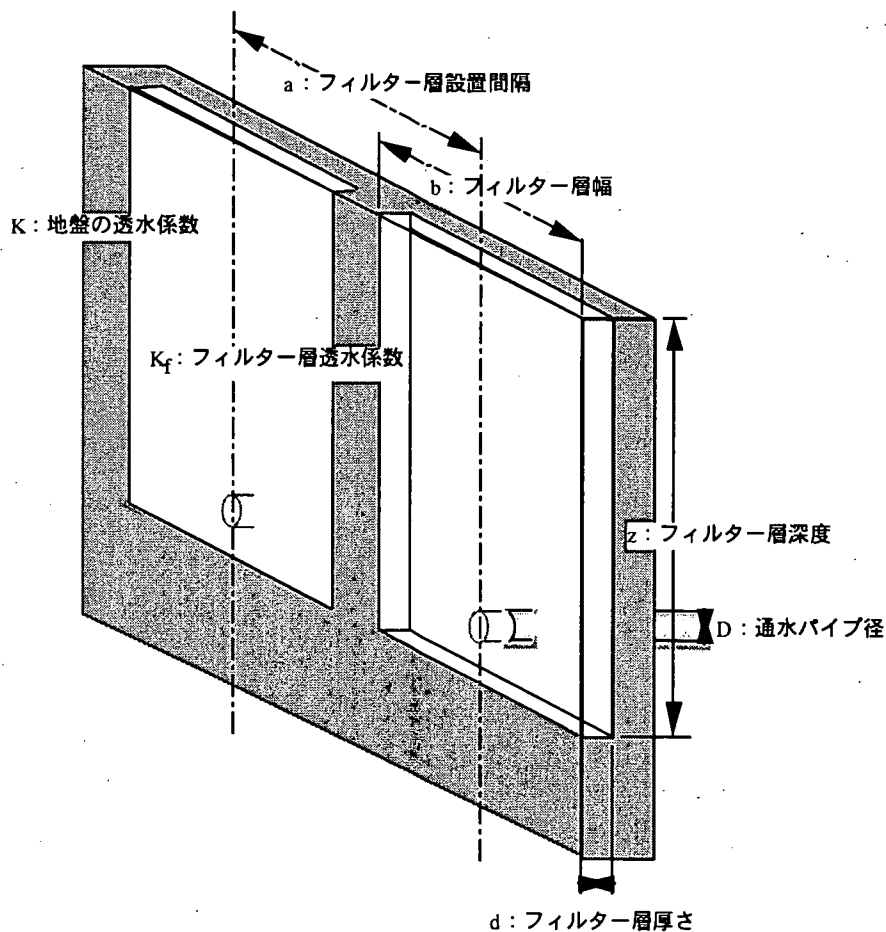


図 3.7.15 面型の集水・涵養装置の諸元概要

(1) フィルター層の設置間隔とフィルター層幅について

基本的には、構造物延長方向の全長にわたり集水・涵養装置を設置することになる。したがって、設置間隔、設置幅などを定める必要はない。しかし、この方向に卓越した地下水流が発生する可能性があるので、必要に応じて適当な間隔で無対策区間を設ける場合がある。このような場合は、設置間隔 a とフィルター層の幅 b を設定する。

(2) フィルター層の透水係数および厚さについて

大東ら(1996)は、フィルター層の透水係数 K_f と地盤の透水係数 K の比 K_f/K に対して、通水パイプ径 D との組み合わせにより通水パイプの必要設置間隔を数値解析で求めた。これによれば、 $K_f/K > 30$ であれば通水パイプの設置間隔を大きくしてもパイプ径はそれほど変化しないが、 $K_f/K < 30$ となると、通水パイプの設置間隔を大きくしたときに太い通水パイプが必要となる結果が導かれている。

また、フィルター層として粒状材を用いる場合には、地盤中の土粒子がフィルター部に流入してこの透水性を低下することがないように設計する必要がある。このためのフィルター材の選定条件として以下が提案されている。

- ・フィルター材が目詰まりしないための条件

$$D_{T15} / D_{85} < 5$$

- ・フィルター層に入った細粒土が通水施設に流出しない条件

$$D_{T15} / D_{15} > 5$$

ここに、 D_{T15} ：フィルター材の15%粒径、 D_{15} ：地盤の15%粒径、 D_{85} ：地盤の85%粒径。

フィルター層内で通水部に向かう流れに対する水頭損失を小さくする必要がある。この方策としては、

- ・フィルター層の透水係数を大きくする
- ・フィルター層を厚くする
- ・通水部の性能を大きくする（通水パイプの径を太くするなど）
- ・通水部の設置間隔を小さくする

などが考えられる。

これを定量的に評価するために水平暗渠の式を応用する。

$$Q = \frac{2\pi K_f d (H - H_w)}{\ln(2H/(D/2))} > aq \quad (3.7.29)$$

ここに、 Q ：通水部1箇所あたりの通水流量、 D ：通水部の換算パイプ径（直径）、 H ：設計目標水頭、 H_w ：集水・涵養装置中間点における自然水頭、 a ：通水パイプ設置間隔、 q ：構造物奥行き方向単位長さあたりの必要通水量。

3.7.8 通水部の設計

通水方式として原地盤あるいはフィルター層を用いる通水層方式と、通水パイプを用いる方式がある。

通水層方式では

- ・通水層設置間隔： a
- ・通水層設置幅： b
- ・通水層透水係数： K_f
- ・通水層厚さ： d

が設計項目となり、通水パイプ方式では、

- ・通水パイプ設置間隔： a
- ・通水パイプ径： D

が主な設計項目となる。いずれの場合もこの部分の損失水頭が十分に小さくなるよう設計する。

【解説】

通水部は遮断される帯水層の代わりをなす部分であり、この部分における損失水頭（動水勾配）を可能な限り小さくするような工夫が必要である。

通水部における動水勾配 I_p は、通水部 1 箇所あたりの必要通水量 Q 、通水部の換算透水係数 K_p 、通水部の断面積 A_p 、通水部の設置間隔 a 、構造物単位奥行きあたりの必要通水量 q を用いると次式で表される。

$$I_p = \frac{Q}{K_p A_p} = \frac{aq}{K_p A_p} \quad (3.7.30)$$

したがって、通水部の損失水頭（動水勾配）を小さくするためには、

- ・通水部設置間隔を小さくする
- ・通水部の換算透水係数を大きくする
- ・通水部の断面積を大きくする

という手法が考えられる。

(1) 通水層方式

通水層方式においては $K_p = K_f$ 、 $A_p = bd$ を用いて通水部の動水勾配が評価できる。通水層を構造物延長方向の全長にわたり設置するばあいは、 $a = b$ となるので式(3.7.30)は、

$$I_p = \frac{q}{K_f d} \quad (3.7.31)$$

と書き改められる。つまり、通水層の透水係数を大きくする、通水層の厚さを大きくするなどの方策により損失水頭を小さくできる。ただし、原地盤をそのまま通水層として用いる場合はこのような改良はできない。

また、面型の集水・涵養装置と同様、この部分が構造物延長方向への水みちとなる可能性があるので、必要に応じて間仕切り区間を設ける。

構造物下部を通水層として用いる場合には、その支持強度にも検討が必要である。締め固め度と透水性は相反する関係にあることを考慮し、適切な撒き出し厚さと締め固め方法を検討する必要がある。

(2) 通水パイプ方式

通水パイプの換算透水係数 K_p の算定式として以下の管路の損失水頭計算式を用いる。

・マンニングの式

$$K_p = \frac{1}{n\sqrt{I_p}} R^{2/3} \quad (3.7.32)$$

ここで、 I_p ：通水部の動水勾配、 n ：マンニングの粗度係数、 R ：径深（＝断面積／潤辺長）
マンニング式を用いる場合には、換算透水係数が動水勾配の関数となっているため、非線形関数の形となる。

・粘性流体の式

$$K_p = \frac{\gamma_w D^2}{32\eta} \quad (3.7.33)$$

ここで、 γ_w ：水の単位体積重量、 D ：通水パイプ径、 η ：水の粘性係数

3.7.9 照査ポイントの水位変動予測

照査ポイント（影響発生予測地点）における水位変動を評価し、設計の妥当性を確認する。

【解説】

有限要素法など数値計算による設計を行った場合は、通水設備の設計と同時に周辺地下水の変動量も出力される。この結果に対して、照査ポイント（影響発生予測地点）における水位変動に着目し設計の妥当性を確認する。

簡易計算により地下水流動保全工法の設計を行った場合には、各施設の通水能力（集水量、涵養量）を考慮した水位変動曲線（水位低下曲線、水位上昇曲線）を重ね合わせて、照査ポイントの水位変動を計算する方法が考えられる。ただし、以下の問題があり容易ではない。

- ・ 無対策時の地下水位の設定方法

無対策時の地下水位分布を想定して、これに各施設による水位変動分を考慮して対策時の地下水位分布を評価する。無対策時の地下水位分布を評価できなければ対策時の水位分布がわからない。無対策時の水位分布予測法としては、2.6.4 で示した連続井戸モデルなどが利用できる。

- ・ 遮断物としての構造物の取り扱い

地下水流を遮断する構造物が存在するため、鏡像法を用いて実施設（実井戸）に対する虚施設（虚井戸）を考慮した水位変動分布を考慮しなければならない。

- ・ 施設ごとの能力、影響圏半径の設定

本来は、施設ごとに能力や影響距離が異なることが考えられる。しかし、簡易計算の手法上、各施設の能力は同一のものと取り扱うことが一般的である。また、施設性能としては目詰まりによる能力低下が進んだ段階の長期性能を用いる必要がある。

以上のように、周辺の水位変動を評価するためには煩雑な計算が要求される。場合によっては、設計の妥当性確認作業は数値計算を用いて行ったほうが簡易であり、現実的といえる。

3.8 目詰まりの設計への反映

3.8.1 目詰まりの種類

集水・涵養装置の仕様・設置ピッチなどの設計にあたっては、以下の 3 種類の目詰まりを考慮する。

- (1) 集水・涵養装置施工時の井戸損失
- (2) 土粒子の移動により生じる初期目詰まり
- (3) 長期的目詰まり

【解説】

集水・涵養装置の設計にあたって考慮すべき目詰まりなどの性能低下要因として以下の 3 種類のものが挙げられる。

(1) 集水・涵養装置施工時の井戸損失

集水・涵養装置施工時の地盤の攪乱、洗浄不良、フィルター材・スクリーンの選定不良などによる井戸損失であり、集水・涵養装置そのものの性能的な問題である。井戸損失を小さくするためには地盤条件に適合した集水・涵養方式、工法を選定する必要がある。また、施工時の洗浄不良などを極力小さくするための細心の注意が必要である（4.1.3 参照）。

(2) 土粒子の移動により生じる初期目詰まり

地盤中の流速が土粒子の限界流速より大きくなると、細粒分の移動が発生して目詰まり現象を起こす。とくに涵養装置側では放射状の流れとなるため、装置から離れるにしたがい流速が低下し、ある部分に細粒分が抑留され目詰まりゾーンを形成する場合がある。この現象は稼動開始後、初期に発生するので初期目詰まりといえる。3.7.1 に示す方法により集水・涵養装置部に十分な流入・流出面積が確保できるよう設計することにより、この目詰まりを防止する。

(3) 長期的目詰まり

水質や地盤の条件により徐々に進行する目詰まり。その原因としては注入水中の懸濁物、帯水層内での化学反応、集水・涵養装置または帯水層での微生物の増加、注入水中の空気などが考えられる（4.3.2 参照）。長期的目詰まりの進行速度はメンテナンスの頻度に影響するため、これを考慮した設計とする必要がある（3.8.3 参照）。

3.8.2 目詰まりと性能の関係

目詰まりの影響を考慮した集水・涵養装置の設計を行うためには、目詰まりによる性能低下を定量的に評価して、目詰まり要因ごとに適切な段階でこれを反映する。

【解説】

図 3.8.1 に目詰まりと性能の関係を概要図として示す。

井戸損失がない理想的な条件で設置された集水・涵養装置の性能を C とする。実際には、施工時に発生する種々の原因（地盤の攪乱、洗浄の不良など）により、これよりも小さな性能しか発揮できない。井戸損失による性能の低減率 α を考慮した性能が初期性能 $C_0 = \alpha C$ であるが、 α の値を適切に評価することは難しい。このため、ここに安全率を見込んで（ α を小さめに設定することにより）設計用の性能（初期性能目標値）を定める。つまり、 α が集水・涵養装置の施工時の井戸損失を設計に反映するパラメータである。

土粒子の移動による目詰まりを防止するためには、集水・涵養装置の初期性能に相当する流速が限界流速以下でなければならない。つまり、初期性能 C_0 として限界流速を超えるような過大な性能 C_c を期待しないことが条件となる。この条件は、3.7.1 で述べた限界流速に基づく設計計算をクリアすることにより反映できる。

長期的な稼動により集水・涵養装置の目詰まりが進行し性能が低下する。ここで、目詰まりの進行状況を表す性能低減関数を $\beta(t)$ とすると、長期的な性能 $C(t)$ は、 $C(t) = C_0 \beta(t)$ と書ける。長期的な性能目標値（管理値） $C(t_m)$ に達した時点でメンテナンスを行うことになるので、目詰まりの進行速度はメンテナンスの時間間隔 t_m に反映される。逆にこれを設計に盛り込むためには、目詰まりの進行速度を評価する必要がある。この手法については 3.8.3 で概説する。

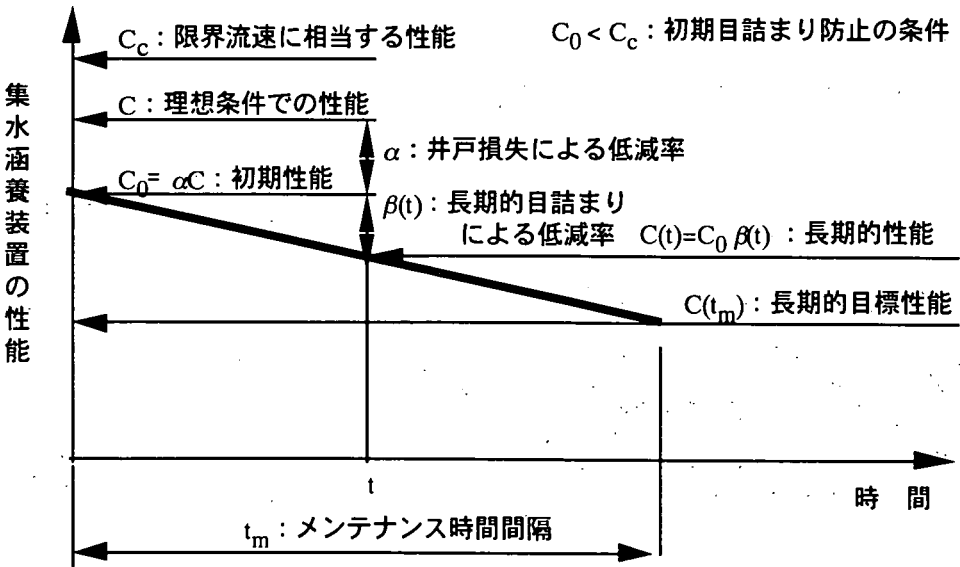


図 3.8.1 目詰まりと集水・涵養装置の性能の関係概要図

3.8.3 長期的目詰まりの設計への反映

長期的な目詰まりによる集水・涵養装置の性能低下が無視できず、所定の時間間隔でメンテナンスが必要となる場合には、性能低下関数を評価して、イニシャルコストとランニングコストを考慮したライフサイクルコストが最小となるような最適設計を行う。

【解説】

通水装置を多数設置して設置間隔を小さくすれば、1セットあたりの必要性能は小さくてよく、メンテナンスの時間間隔を大きくできる。同じ初期性能が期待できる通水装置を、設置数を減らして設置間隔を大きくすると、1セットあたりに要求される性能は大きなものとなるため、メンテナンスの時間間隔は短くなる。

性能低下を表す時間関数が推定できれば、設置間隔に対応するメンテナンス時間間隔が試算できる。さらに供用期間を設定すれば、設置に要するイニシャルコストとメンテナンスに要するランニングコストを評価したライフサイクルコストが最小となる最適設計が可能になる(高坂 2000c)。

図 3.8.2 は集水・涵養装置の性能変化を装置間の水位差で表現して、3通りの設置間隔について性能の経時的な変化を試算したものである。設置間隔を小さくすると ($a=10\text{m}$ の場合)、性能の初期値と管理値の幅を大きくとれるとともに、個々の流量が小さいために目詰まりの進行が遅く、メンテナンス間隔は長くなる。逆に設置間隔を大きくした場合 ($a=40\text{m}$ の場合) は、初期値と管理値の幅が小さく、目詰まりの進行速度も速いためメンテナンスの間隔は短くなる。これをある条件のもとでコスト試算した結果が図 3.8.3 である。設置間隔を大きくすると、設置コスト (イニシャルコスト) は小さくなるがメンテナンスコスト (ランニングコスト) が大きくなる。この両者を足し合わせたトータルコストはある設置間隔 (この例では $a=35\text{m}$ 程度) で最低となっており、これが最適設計と考えられる。

ただし、現状では性能低下を表す関数を設計段階で評価することは難しい。長期的な性能低下に関するデータの蓄積を待つ必要がある。

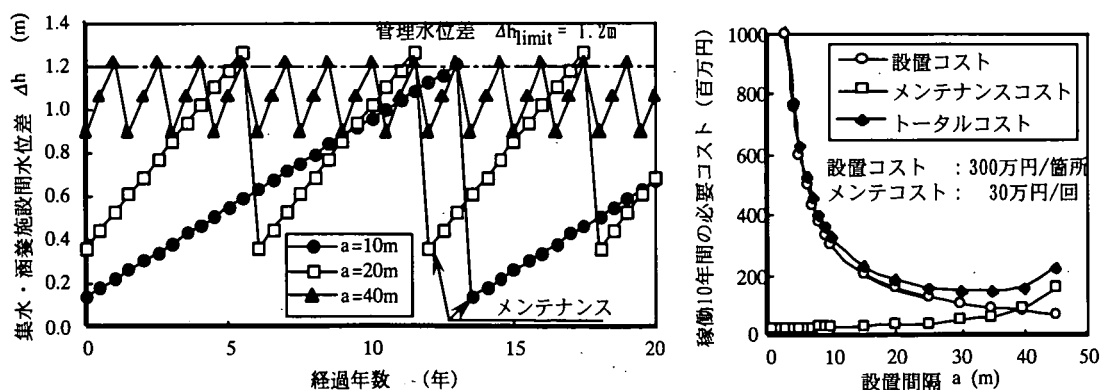


図 3.8.2 設置間隔による性能変化の試算結果

図 3.8.3 設置間隔によるコスト試算例

このように、地下水流動保全工法における目詰まりは、施工責任による初期の目詰まり（井戸損失）と自然条件に依存する長期の目詰まりがあるため、これをどのように設計に反映させるかが問題となる。基本的には、以下のような性能規定型の発注形態とすることが合理的と考えられる。

- ・現象項目（地下水位変動、地下水流動量の変化）に対する限界値、許容値（3.4 参照）を評価し、これに余裕度を見込んだ管理値（長期性能目標値）を定める。
- ・発注者はライフサイクルコストを考慮して、長期性能を合理的な期間にわたり維持するための現象項目の設計値（初期性能目標値）を定め、これを規定した発注とする。
- ・施工者は短期的な目詰まり（井戸損失）を考慮して、設計値（初期性能目標値）が満足できる通水施設の設計および施工を行う。
- ・供用開始後、初期段階で規定された性能（設計値：初期性能目標値）が満足されていることを確認し引渡しを行う。この時点で初期性能が満足されなければ、施工者の責任において通水施設の機能向上、追加などを行う。
- ・引渡し後は管理者の責任において管理値（長期性能目標値）が満足されるような維持・管理を行い、必要によりメンテナンス作業を行う。

参考文献

3. 設計で参考、引用、参照した文献を以下にまとめる。

大野睦雄, 山崎 彌, トランデュック・フィ・オアン (1984), 砂のパイピング特性に関する実験的研究 (第2報), 第19回土質工学研究発表会, 1335-1336.

高坂信章(1999), 地下水流動保全工法の設計の考え方, 地下水地盤環境に関するシンポジウム'99-地下水の流動保全と地下環境-発表論文集, 115-134.

高坂信章(2000 a), 井戸の限界揚水量に関する考察, 第35回地盤工学研究発表会発表講演集, 1545-1546.

高坂信章, 成田昌弘, 斎木正(2000 b), 土留め壁背面に設置する水平水抜き孔の設計の考え方, 土木学会第55回年次学術講演会, III-A253.

高坂信章(2000 c), 地下水流動保全工法における集水・排水設備の設置間隔, 地盤工学会中部支部 第12回地盤工学シンポジウム論文集, 15-22.

進士喜英(1998), 地下水問題の数値モデル化技術の一考察, 地下水技術, Vol.10, No.10, 23-34.

進士喜英, 狩野裕之, 和田卓也, 橋本正(1999), 地下水流動阻害の影響および対策工法の簡易計算法, 地下水地盤環境に関するシンポジウム'99-地下水の流動保全と地下環境-発表論文集, 97-114.

進士喜英, 狩野裕之, 中島誠, 武曉峰, 勝田力(2000), 水平井戸による集水効果の簡易予測法の開発, 2000年秋季講演会講演要旨, 日本地下水学会, 180-185.

大東憲二, 植下協, 市川悦男(1996), 堀割構造物周辺の地下水流動保全に関する研究, 土木学会論文集, No.535/III-34, 13-21.

土橋浩, 並川賢治, 多田浩治, 松田義則(1999), 通水性RC地中連続壁の設計・施工, 地下水地盤環境に関するシンポジウム'99-地下水の流動保全と地下水環境-, 63-78.

(社)日本機械学会(1968), 機械工学便覧 改訂第5版, (社)日本機械学会, 8.15-8.18.

西垣誠(1986), 単孔式原位置透水試験法の整理(その2), 地下水と井戸とポンプ, Vol.28, No.3, 15-24.

Kono, I. (1973), The equivalent radius of a source in numerical models of groundwater flow, Proc. of JSCE, No.218, Oct., 103-107.

4. 施工・メンテナンス

4.1 地下水流動保全対策工法

4.1.1 地下水流動保全対策工法の選定

一般に、地下水流動保全対策工法は土留め壁工法に影響される。すなわち、構造物躯体を築造するための土留め壁は、施工条件・環境条件・経済性を考慮し、その構造と工法が選定されており、地下水流動保全対策工も、その選定フローへ組み込まれる。

土留め壁の選定要因において、地下水流動保全が必要であるかどうかは、その影響の評価に依存する。

止水壁の上流側では、地下室からの漏水や止水壁への偏圧の発生、また下流側では、井戸枯渇・地盤沈下・地下水汚染などの周辺環境阻害が生じる。施工中、施工後を通じて、これらの影響を最小限にとどめるための流動保全工法を選定する必要がある。

図 4.1.1 に、地下水流動保全の対策が必要な場合の土留め壁選定フローを示す。

地下水流動保全対策工法は、概略の土留め構造が決定された後に、以下の条件を考慮し、その構造が選定される。

- (1) 遮断滞水層深度と構造物および遮水壁深さの関係
- (2) 集水・涵養施設と構造および遮水壁深さの関係
- (3) 通水施設と構造物および遮水壁深さの関係
- (4) 遮水壁と占有用地の関係

表 4.1.1 に、遮断滞水層と集水・涵養施設、通水施設の組み合わせを示す。

表 4.1.1

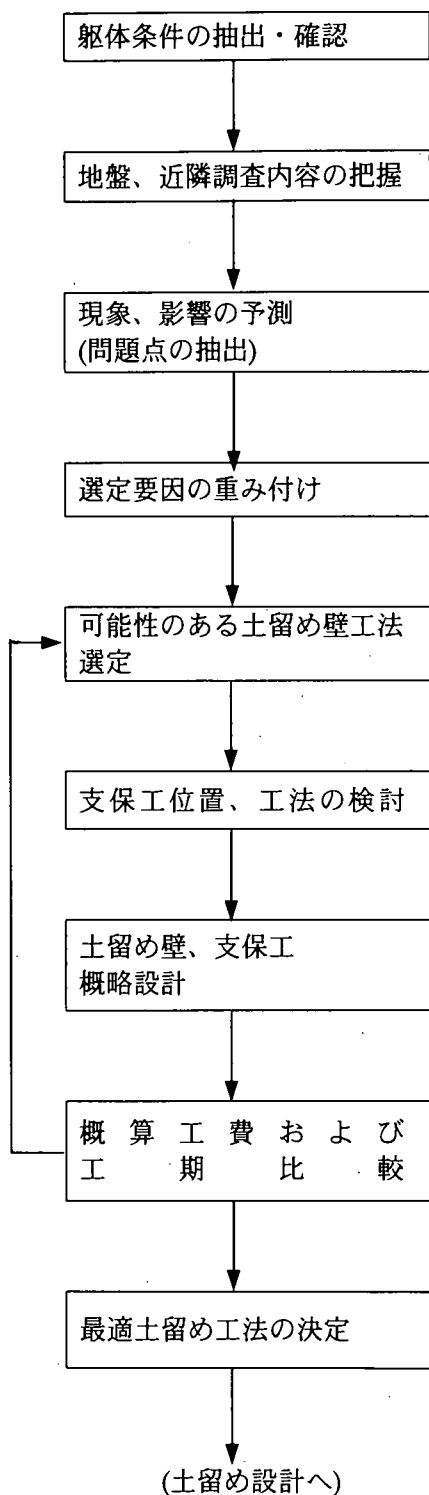
遮断滞水層	集水・涵養施設				通水施設		
	1) 土留め壁撤去	2) 土集留水め・壁涵削養孔設置	3) 集土水留め・め涵壁養機能付き	4) 集水・涵養井戸	A) 躯体下部通水層	B) 通水管	C) 躯体上部通水層
構造物上部	○ 4,7	○	○ 9	○	c)	○	○ 4,7
構造物同深度	a) 4,5	○ 2,6	○ 1,3,9	○ 8	c)	e) 2,5,6,9	f)
構造物下部	○ 4,5	b)	○ 1,3	○ 8	d) 1,5	d) 3,8,9	f)
余敷地	—	必要	—	必要	—	—	—
余掘削	—	—	—	—	必要	場合により必要	—

注) ○印は、施設認定可能を示す。

a)～f)は(4-3)ページに留意事項を示す。

下段番号は、4.2.1 施工事例番号を示す。

< 選 定 手 順 >



< 内 容 >

躯体・基礎形状寸法、敷地面積、敷地境界、掘削深さ
設備スリーブの大きさ・位置(外壁)

ボーリング柱状図(土質、礫径)地下水位、水質、使用
状況、気象、近隣構造物の規模、基礎、老朽度、環境
制約、近隣土留め実例

諸沈下(圧密、不同、地表埋設管)クイックサンド、
ヒーピング、浮上り、排水不能、公害苦情
井戸枯れ、遮水による地下水位上昇

許容値、無公害の程度、補償、止水の程度、影響
の重要性、工期制約、地下水の流動保全

止水壁、透水壁、引抜きの有無、プレロードの有無、
併用補助工法、壁配置、地下水の流動保全工法

支保工の種類、段数、位置、架構、施工法、盛替え方
法、撤去、解体方法、切梁支柱

壁、支保工材料の諸元・仕様、許容応力度と応力算定
法、安全率、数量、業者、概略設計図、
地下水流動保全工法との適応性

地下工事概略工程表、支給材、工事費内訳、関連工事
工事経歴、信頼性、地下水流動保全工費の割合

図 4.1.1 選定フロー図

集水・涵養方式については、土留め壁撤去方式は、遮断壁を撤去するもので施工中は対応できないことから地下水位低下工法、リチャージ工法など補助工法が必要な場合がある。

集水・涵養機能付き土留め壁方式は、土留め壁内に集水・涵養装置（機能）をもったものである。

集水・涵養井戸方式は、土留め壁外部に集水・涵養井戸を設置したものである。

土留め壁削孔集水・涵養管の設置方式は、土留め壁設置後、対象透水層まで掘削し、土留め壁内より滞水層へ水平ボーリングを行い集水・涵養孔を設置する。

通水施設は、通水管（構造物内・外）と碎石等による通水層がある。

表 4.1.1 の遮断滞水層位置と集水・涵養・通水施設との関係における留意点を以下に示す。

- a) 土留め壁は撤去するが構造物自体が遮水するので別途対策が必要である。
- b) 構造物深度あたりからの斜めボーリングとなり、非動力通水では、越流方式の通水となる。
- c) 遮断滞水層深さと通水深さが異なる場合で通水管を用いない場合には、サイフォン構造を構造物側部などに設置しなければならない。
- d) 通水施設のための余掘削が必要である。
- e) 構造物内部の管設置であるため構造的安定および本来の機能が確保されているかの確認が必要である。
- f) 遮断層より上部で通水する場合には、非動力通水では越流となる。

集水・涵養施設及び通水施設は土留め壁の種類により、比較的簡単な構造のものから、特殊な構造や工夫を用いている事例があり、土留め工法の種類が決定された段階で、どのような集水・涵養機能や通水機能を適用できるか、表 4.1.1 及び 4.2.1 施工事例を参考として、施工性と経済性を考慮し現場状況に合った工法を選択することが望ましい。

4.1.2 対策工法の留意点

4.1.2.1 土留め壁施工法とその留意点

対策工法は、集水・涵養施設と通水施設から構成される。

施工条件を考慮した構造と、必要通水性能を有する各施設が選定され、遮水性土留め壁の施工に伴い、各施設も施工される。

(1) 集水・涵養施設

集水・涵養施設は、土留め壁内、土留め壁貫通孔(ボーリング孔)と土留め壁の背面に分類される。

- ・土留め壁撤去方式については、鋼矢板等の引抜きに対する検討や、その際の地盤沈下、また固化壁の場合は、その完全な撤去とドレーン材の均一な置換に留意する必要がある。
- ・土留め壁削孔集水・涵養管設置については、水平削孔時の湧水や細砂の流入やストレーナーパイプと土留め壁の接合部構造に注意する必要がある。
- ・集水・涵養機能付き土留め壁施設については、柱列式地下連続壁、地下連続壁において、芯材もしくは、エレメント内に、取水施設を埋め込むタイプである。

- ・柱列式地下連続壁については、ソイルモルタルとドレーン材の均一な置換と、孔壁の洗浄等に留意する必要がある。

また地下連続壁については、通水ボックスへのコンクリートの流入や通水井の洗浄(泥膜の除去、仕上げ)等に留意する必要がある。

- ・土留め壁背面施設には、集水・涵養井方式があるが、掘削方法(泥水掘削、ケーシング掘削)のちがいに、ドレーン材と接触面の仕上げ洗浄等に留意する必要がある。

(2) 通水施設

通水施設は、躯体下部通水、通水管、躯体上部通水に分類される。

- ・躯体下部通水層は、構造物下に設置することとなるので、土留め壁の安全検討を考慮する必要がある。
- ・通水管は、構造物内部と外部の配管があるが、内部の場合、構造的弱部となるので、配管規模に応じて構造検討も考慮する必要がある。

下部配管は、埋戻し工に対する防護工も考慮する必要がある。

- ・躯体上部通水層は、埋戻し土による目詰りを生じさせないためシート等の遮断層も考慮する必要がある。

以上の様に、施工時に通水性能を損なわないために、その保護や洗浄等を行うことが最も重要であると考えられる。

4.1.2.2 通水井施工法とその留意点

集水および涵養のために作製する井戸やドレーンの性能は、削孔方法や構造および洗浄・仕上げ方法などによって異なる。スクリーン材を用いた井戸方式およびフィルター材(透水性材)を用いたドレーン方式とも、通常の井戸やドレーンの作製方法と同様の施工が可能である。そのため、通水性能の評価方法は、井戸の設計やドレーンの設計に準ずる。しかし、自然流下方式の通水では、動水勾配が非常に小さいことから、井戸の洗浄や仕上げには十分な留意が必要である。

以下に、一般的な井戸やドレーンの作製上の留意点を示す。

(1) 井戸作製上の留意点

①オープンホール井(ケーシングなしで削孔する井戸)

オープンホール井は、孔壁崩壊を防ぐためのケーシングを用いないで削孔する井戸である。そのため、孔壁崩壊の防止目的で、削孔時にベントナイトや粘土などの泥水を用いる。我が国での深井戸は、ほとんどがこのようなオープンホールで作製されている。オープンホールは、パーカッション式やロータリー式などのボーリング機で削孔される場合が多く、大口径になると場所打ち杭用のリバーササーキュレーション式機械を用いる場合もある。

孔壁崩壊の防止目的で用いられる掘削泥水は、掘削孔の周囲に極めて透水性の低いマッドケーキを形成して、泥水圧により孔壁の安定を保つものである。したがって、井戸利用のためには、このマッドケーキを除去して通水性を確保するための入念な洗浄と仕上げが必要となる。

洗浄や仕上げの効果は、通水面に設置するスクリーンとその洗浄方法の組合せによっ

て大きく異なる。最も洗浄効果の高いスクリーンは、水平連続Vスロット構造であるといわれ、ジェットリングはこのスクリーンに最も適した洗浄方法とされている。一概にはいえないが、スクリーンの種類と洗浄の方法およびその程度によって、井戸の性能は異なる。

② ケーストホール井（ケーシングを用いて削孔する井戸）

ケーストホール井は、ケーシングによって孔壁の崩壊を防ぎながら削孔する井戸である。そのため、オープンホールのように掘削泥水を用いる必要がなく、いわゆる清水掘りで削孔できる。施工機械には、場所打ち杭用のベノト機が利用されることが多い。

したがって、ケーストホールでの通水面は、ケーシングの圧入や揺動によって多少乱されるものの、掘削泥水の使用によるマッドケーキに比べると通水性への影響は少ない。スクリーンや洗浄方法については①と同様である。

(2) ドレーン作製上の留意点

① ドレーン材の粒径

ドレーンの通水性を高めるためには、ドレーン材の粒径を大きくすると有利になるが、一方、粒径が大きすぎると地盤中の細粒分が流入することによって透水性の低下が生じる。一般的には、フィルター材となるドレーン材の適切な粒径を、地盤土の粒径との関係から下式によって推定している。

$$D_{G15}/D_{S85} < 5 \quad (\text{日本大ダム会議})$$

D_{G15} : ドレーン材の 15% 粒径

D_{S85} : 周辺地盤の 85% 粒径

したがって、ドレーン材には、地盤土の粒度特性に適した粒径を選択する必要がある。

② 通水性低下部の除去とドレーン材細粒分の除去

地盤とドレーンとの境界部は、削孔作業によって通水性が低下する可能性がある。また、ドレーン材中には少量の細粒分が含まれる可能性が高い。特に、涵養側においては、ドレーン材中にふくまれる細粒分が通水地盤面に流入し、通水性を低下させることが懸念される。

このためドレーンは、通水地盤面やドレーン材の洗浄・仕上げができる構造とすることが望ましい。

4.2 施工事例の検討

4.2.1 施工事例の紹介

表 4.2.1 施工事例(収録)一覧

施工事例 番号	施工事例名	Page
1	半地下構造道路の地下水障害対策	4・7～ 10
2	環八井荻・開削トンネル工事における地下水覆水対策	4・11 ～14
3	高速道路開削トンネル部における地下水保全対策	4・15 ～18
4	通水性 SMW による地下水保全対策	4・19 ～22
5	阪神高架化地下部工事における宮水水脈保存対策	4・23 ～26
6	神戸三宮地下鉄工事における地下水保全対策	4・27 ～34
7	福岡市高速鉄道 2 号線工事（東公園工区）における覆水対策	4・35 ～38
8	道路建設の切土区間における地下水環境保全のための覆水工法の検討	4・39 ～42
9	京都市地下鉄烏丸線における地下水保全対策	4・43 ～46

対象工事及び対策工法の概要

施工事例番号；1

通水工法の分類；B-1.B-3

施工事例名	半地下構造道路の地下水障害対策		
Key Word	掘割道路，地中連続壁，SMW，通水窓，鋼矢板，トレーサー試験		
対象工事名称 及び概要	工事名称； 名古屋高速道路高速1号（吹上～四谷間） 工事概要； 名古屋高速道路高速1号（吹上～四谷間）は、名古屋市中心街に近接した市街地をほぼ東西方向に横断する、土留工法として、鋼矢板、SMW、地中連続壁の3工法を用いた掘割道路の建設。		
工事区分 工 期	掘割道路建設工事		
通水対策工法	土留壁の根入れは熱田層の基底面付近まで達しており、GL面下5m付近に存在する地下水の流通をほぼ完全に遮断するようになっていた。また、道路建設前の地下水の流れは、ほぼ北東から南西方向であった為、当初より土留壁の施工によって地下水障害を伴う可能性が高いことが指摘されていた。このことから、遮水性の土留壁に対して通水対策を施した。		
① 目 的			
② 土留壁	対象道路区間の土留工法としては、鋼矢板、SMW、地中連続壁の3工法が採用されている。		
③ 復水工	土留壁にスリット状の鉛直な窓を開けた通水窓と、躯体床版下に横断方向の暗渠を施設した横断通水部の2つの対策の組合せ		
	SMW区間	横断水路として床掘時の掘割り構造直下に横断方向（10mピッチ）と、SMW内側の縦断方向に梯子状の暗渠を設置し、通水窓として掘割構造完成後に全旋回のロックオーガーによりSMWを撤去し碎石に置き換え鉛直の通水窓とした。	
	地中連続壁区間	横断水路として床掘時の掘割直下に横断方向（20mピッチ、南北の通水窓と直結）と、地中連続壁内側の縦断方向に梯子状の暗渠を設置した。また、通水窓として地中連続壁施工時に前もって20mピッチの通水窓を開けて矢板により遮水しておき、掘割構造完成後に矢板を引き抜いて通水窓とした。	
地質・地形	地形	熱田層を主体とした台地、西端は大曾根層からなる低位台地、東端は八事、唐山層の分布する東部丘陵	
	地質	熱田層の上部は砂質土からなる帯水層、下部は粘性土あるいは粘土分を多量に含んだ比較的難透水性の土質 西端の大曾根層は非常に透水性の高い砂礫からなる帯水層 東端の八事・唐山層は粘性土分に富んだ砂礫からなる難透水性の地層	
観測手法	各工区中間部の横断方向に地下水位観測点を各工区当り8箇所設け、週毎に地下水位を測定		
地下水位 変動予測	解析手法	準3次元FEM地下水解析 （3者比較）	
	影響予測	通水対策なし	最大水位上昇 2.0m 最大水位低下 1.5m
		通水対策実施	最大水位上昇 0.1m 最大水位低下 0.1m
		①建設前 ②建設後（通水対策無） ③建設後（通水対策実施）	

水理定数	透水係数 砂質土層； $1.0 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ ，粘性土層； $1.0 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$ 砂礫層； $1.0 \times 10^{-1} \sim 10^{-5} \text{cm/sec}$ 横断通水部の透水係数； $k=2.28 \times 10^{-1} \text{cm/sec}$ ，ダルシー流速； $v'=6.70 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$	
対策効果の評価	計算水位の対策効果	道路南北での水位差は無対策の場合で2.5～3.5m， 通水対策実施時には0.2～0.5m
	建設前後の実測水位	隣接工区の工事の影響あるいは近接地下構造物の影響が複雑に現れた。
	計算水位と実測水位	道路建設後の実測水位は道路南北で0.7～1.7m
	評価	無対策を想定した場合の計算水位差と比較すると、対策を施した場合の実測水位はかなり小さな値となっており、想定日時の違いあるいは隣接工区の影響を考えた場合、対策効果は十分発揮されていると思われる。
参考文献	1) 深田 清明，松井 文和「都市部における連続した半地下構造道路の地下水障害の対策事例」 1) 名古屋高速道路公社「市道高速1号（吹上～四谷）地下水影響検討（その1）～（その3）業務委託」報告書 平成4年～平成8年 2) 大東 憲二，植下 協「掘割構造物建設時の地下水位状態保全対策に関する研究」 第7回地盤工学シンポジウム論文集 平成7年7月 3) 大東 憲二，植下 協，高木 利則，安江 勝夫「掘割道路建設における地下水状態への影響評価に関する研究」 土と基礎 Vol.43 No.9 4) 大東 憲二，植下 協，市川 悦男「掘割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Ⅲ 1996-3 No.535	

概略構造図

通水工法平面図

・SMWは、道路完成後においてφ1.0mのロックオーガーにて20mピッチで取除く。

A-A 通水部横断面図

B-B 横断通水部断面図

SMWおよび通水工法概要図

通水工法横断面図

A-A 通水壁断面図

パース図

①天板面

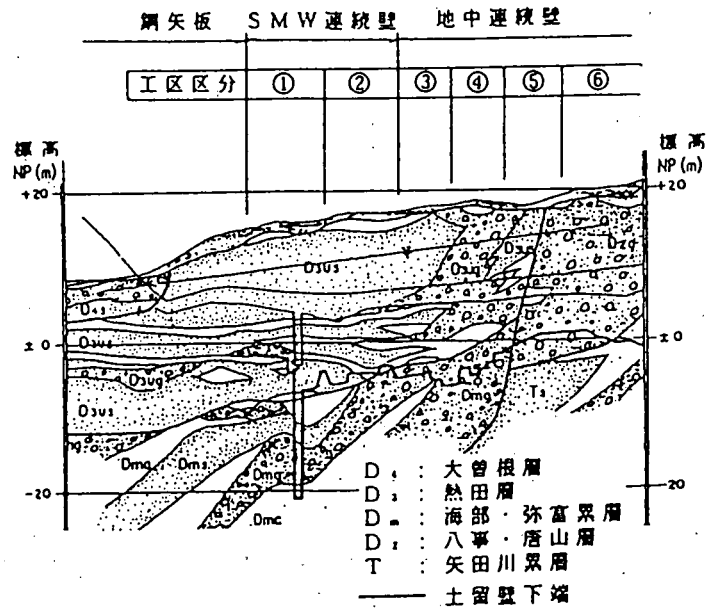
②天板面

B-B 横断通水部断面図

・通水壁部は、施工中シートパイルによって遮水壁となっているが、施工完了時にシートパイルを引抜き通水壁となる。
・通水壁部は、道路延長で20mピッチに施工する。

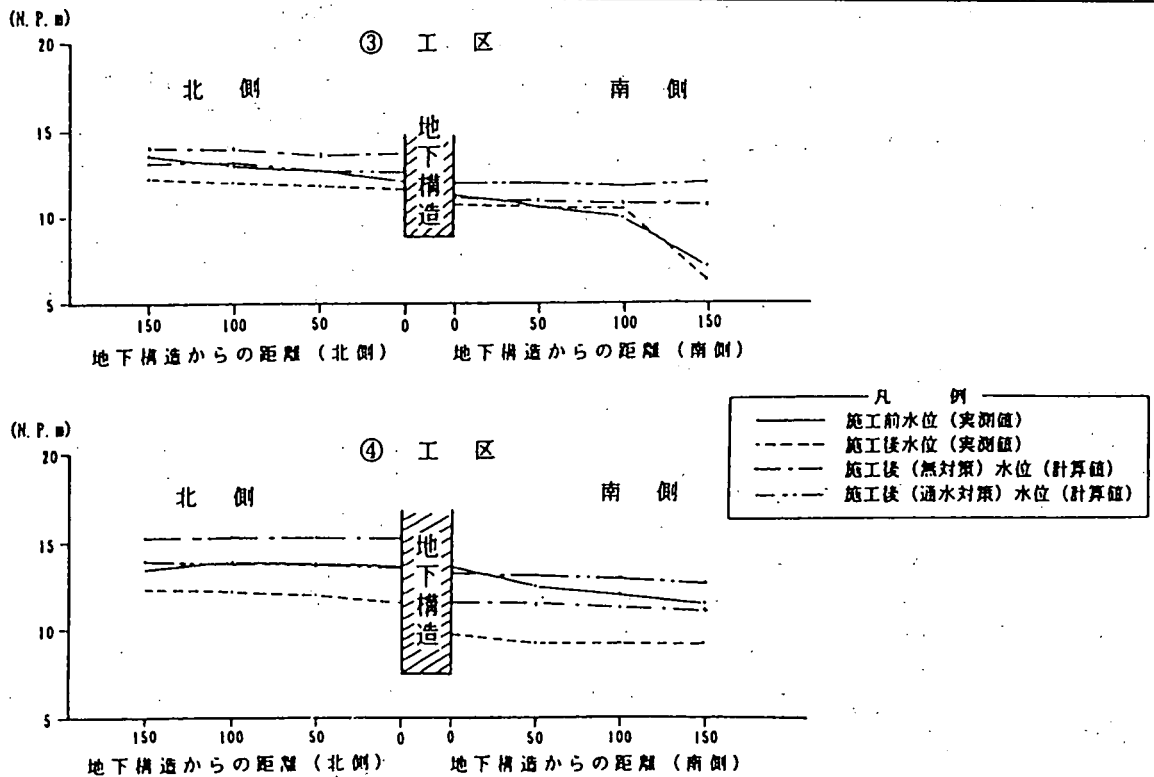
連続地中壁および通水工法概要図

路線沿いの地質縦断図



路線沿いの地質縦断図

地下水分布の変動



道路横断方向 (南北) の実測水位と計算水位の比較

対象工事及び対策工法の概要

施工事例番号；2 通水工法の分類；A-2,B-2

施工事例	環八井荻・開削トンネル工事における地下水復水対策
Key Word	道路立体交差、RC 連壁・SMW、通水管、ダムアップ、復水工、計測管理
対象工事名称および概要	<p>工事名称：環状第 8 号線井荻立体工事【図-1～3】</p> <p>工事概要：事業延長 1,895m、施工延長 1,552m、トンネル延長 1,263m 上り下り各 2 車線のボックスカルバート</p>
工事区分	道路（開削工法）(S.63.4～H9.3)
①目的	土留壁設置後、周辺地下水位は止水性の土留め壁によって上流側で堰き上げられ下流側で低下したため、下流側地下水位の回復を図る。
②対策工	<p>(1) 躯体底版中への通水管設置（第一期（平成 5 年度）、第二期工事（平成 6 年度））【図-4】</p> <p>(2) 躯体上床版上部からの斜め通水管設置（平成 7、8 年度）【図-5】</p> <p>(3) 柱列式ソイル壁の切削除去（SMW 切削・砂置換工法、平成 8 年度）【図-6】</p>
③通水管設置	<p>(1-1 期)復水対策工の施工は、左右の土留め壁をくり抜いて止水弁を取り付けた後、底版配筋と一緒に通水管(内径φ300mm の铸铁管)を約 15,20,30m 間隔に独立し 14 本設置した。</p> <p>(1-2 期)φ200mm の铸铁管を 5～12m 間隔に配置するとともに 3～4 本を連通管（φ100mm）でお互に繋ぎ、さらに、民有地との間に余裕があったため、背面地盤側にストレーナー管（長さ 1.8～5.7m）を水平に設置した。通水管本数は北側 23 本、南側 9 本、西武区間 6 本、一期二期合わせて総計 52 本である。</p> <p>(2) 井草川に沿った「水みち」をねらって、3 本の通水管を新設した。施工は構築したトンネル躯体上床版の上にダイヤモンドボーリング機械を設置して土留め壁の地下連続壁を穿った後、オーガ排土ケーシング直押し推進工法で斜め 15 度下方に長さ 24m、内径 150mm の集排水管を設置した。武蔵野礫層内の管長は約 17.5m、水平距離約 16m である。</p> <p>(3) 超高圧噴流水で土留め壁根入れ部の SMW の芯材である H 型鋼(H-400)を残したままソイルモルタルを切削除去した後、単一粒径の砂で置換し、土留め壁の根入れ部に透水面を設けた。施工範囲は、壁延長で 5m² 力所計 10 m である。</p>
地質・地形	当該区域には 3 つの滞水層があり、最も透水性が大きく有能な流動の場と考えられるのは、第一滞水層の武蔵野礫層である。武蔵野礫層の厚さは、概ね 10m 前後(9～12m)であり、全体に数 100 分の 1 程度の緩い勾配で東側に傾斜している。
観測手法	観測井戸、通水性能試験
地下水位変動予測	<p>三次元有限要素法による浸透流解析</p> <p>土留め工事終了後は工事前の地下水位分布が壁で不連続となり、地下水流の下流側となる土留め壁東側の井草川に沿う低地部の水位低下が現れている。しかし、通水管設置により不連続となっていた地下水位の等高線が再び連続して T.P.+37m の線を形成し、地下水位の回復が計算されている。</p> <p>土留め工事終了後（通水管設置前）と第二期通水管設置後の差は、トンネル区間の東側で 0.4～0.5m と計算された。また、工事前と第二期通水管設置後の差を計算すると、第二期通水管の設置にも係わらず、工事前と比べてなお最大で 2.75m の水位差があり、回復が十分でないという結果となった。</p>
水理定数	<p>①滞水層</p> <p>沖積層・ローム層：$k = 1 \times 10^{-3} \text{cm/s}$（大部分） ：$k = 1 \times 10^{-2} \text{cm/s}$（井草川付近）</p> <p>第一滞水層：$k = 5 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^0 \text{cm/s}$（武蔵野礫層と東京層上部）</p>

	<p>第二滞水層： $k = 5 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ (東京層下部)</p> <p>②難透水層</p> <p>a)沖積層とローム層下： $k = 4 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ (腐食土及び凝灰質粘土層)</p> <p>b)武蔵野礫層中に狹在： $k = 1 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ (トンネル底版相当深さ)</p> <p>c)難透水層分布域： $k = 1 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$</p> <p>d)難透水層欠如域： $k = 1 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$</p> <p>③止水壁 地下連続壁及びSMW壁： $k = 1 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$、幅 50cm 相当</p>
対策効果の 評価	<p>(1) 躯体底版中へ設置した通水管の効果(第1期H.5、第2期H.6)</p> <p>第2期通水管設置後、特に施工区間の北側工区で顕著な効果が現れている。通水管を設置した時期の降雨量が多いにも係わらず上流側(西側)で低下し、下流側(東側)で上昇した。定量的には効果の確認できなかったものもあったが、定性的には平面的な効果の広がり認められた。</p> <p>(2) 斜め通水管の効果(H.7~8)</p> <p>「水みち」を狙った3本の斜め通水管の通水効果は顕著であった。土留め壁に最も近い観測井で測定した水位は、斜め通水管施工前のH8.3末時点と比べると、上流側(L1-10)での基底水位は標高T.P.約41mと変わらず、下流側観測井(R1-10)での基底水位は、約1.7m上昇して工事前(H1.2)の地下水面高T.P.38.7mまで回復した。土留め壁から最も離れた下流側観測井(R1-200)で測定した水位も約0.7m上昇してT.P.37.7mとなり、工事前の地下水面高のT.P.38.9mに近づいている。</p> <p>(3) 柱列式ソイル壁の切削除去の効果〔SMW 切削・砂置換工法〕(H.8)</p> <p>流向・流速の観測からは一部効果がみられたが、地下水位の経日変化からは、水位回復を確認するには至らなかった。</p>
参考文献	<p>1) 青木滋、遠藤毅、石井求(1970)：杉並区の浅層地下水について - 東京の地下水系の研究(3) -、東京都土木技術研究所報告、第46号、75-94。</p> <p>2) 練馬区役所(1969)：練馬区地下水調査報告書。</p> <p>3) 杉本隆男・三木 健・上之原一有・中沢 明・林 喜久英・田村真一・張替 徹(1995)：環8・井荻トンネル工事での地下水対策工、東京都土木技術研究所年報、平成7年、pp.211-218。</p> <p>4) 地下水流動保全工法に関する研究委員会 設計ワーキンググループ：地下水流動保全工法の設計の考え方、地下水地盤環境に関するシンポジウム'98、発表論文集、地下水地盤環境に関する研究協議会、1998。</p>

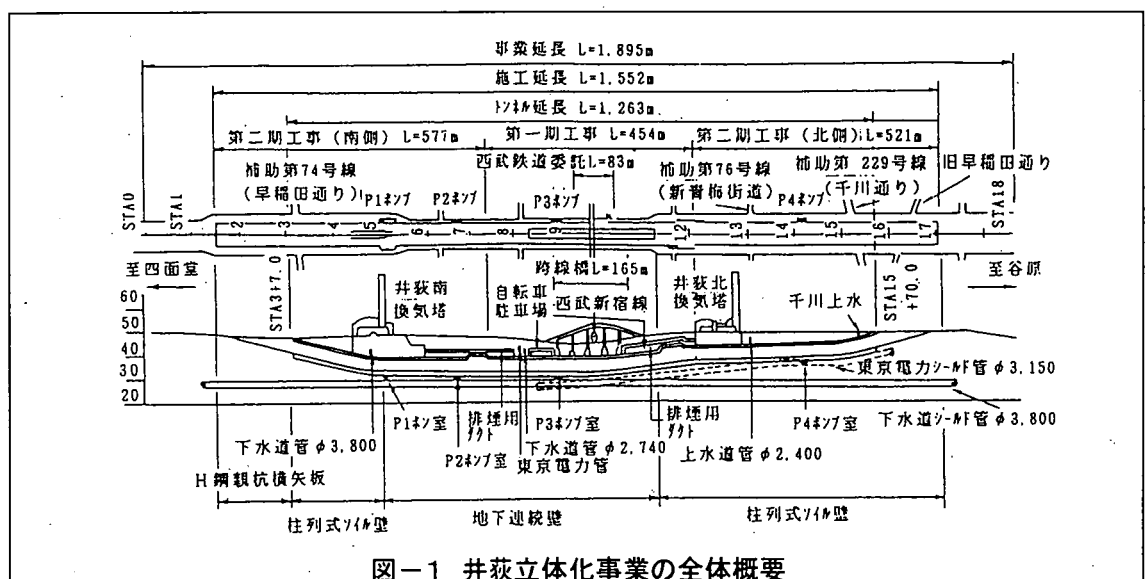
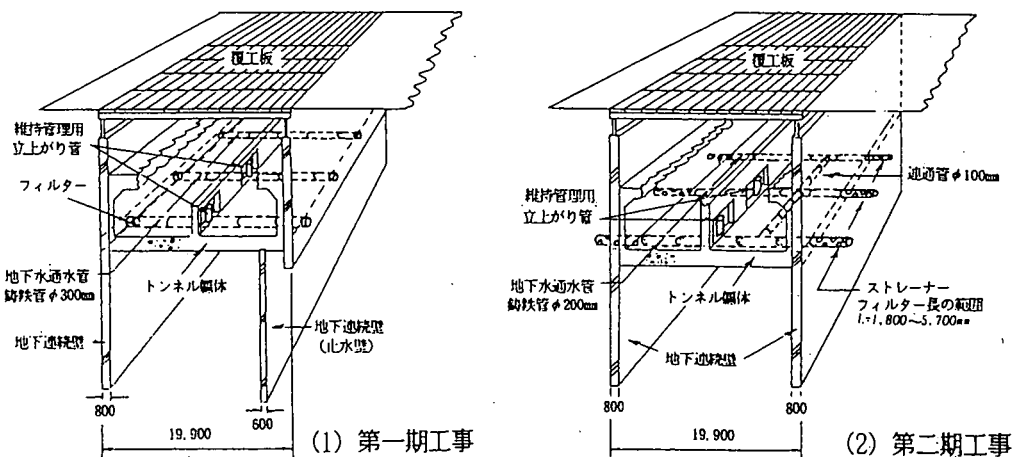
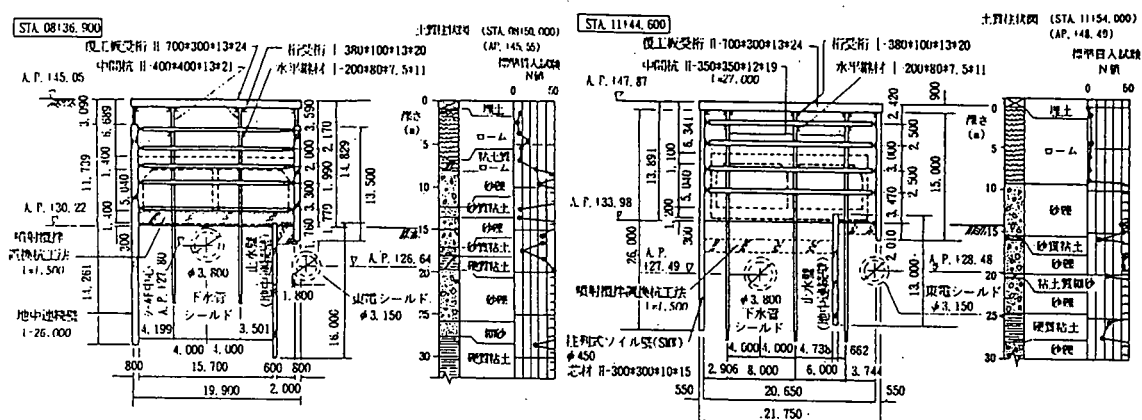
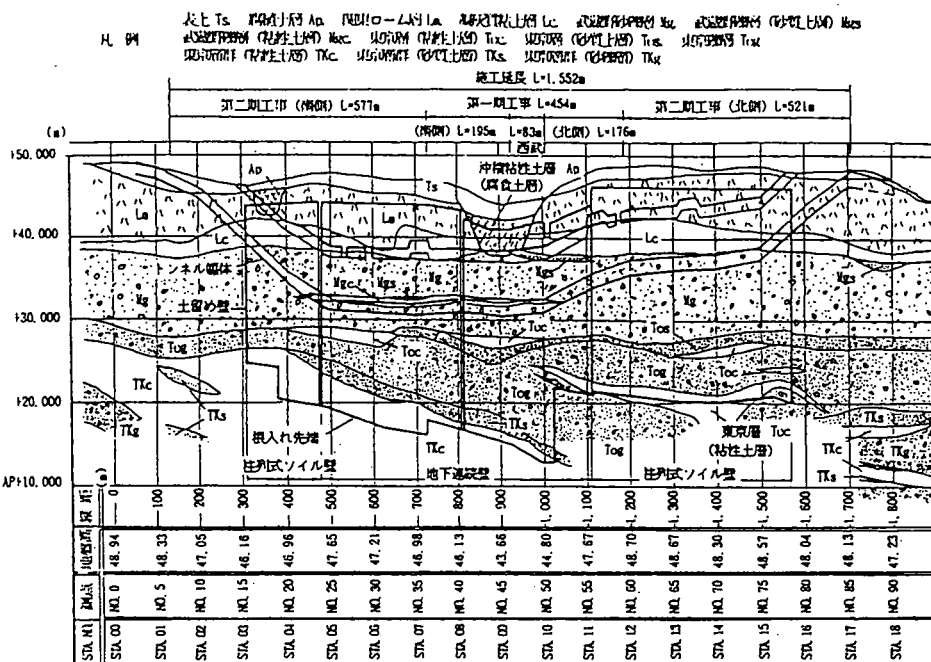


図-1 井荻立体化事業の全体概要



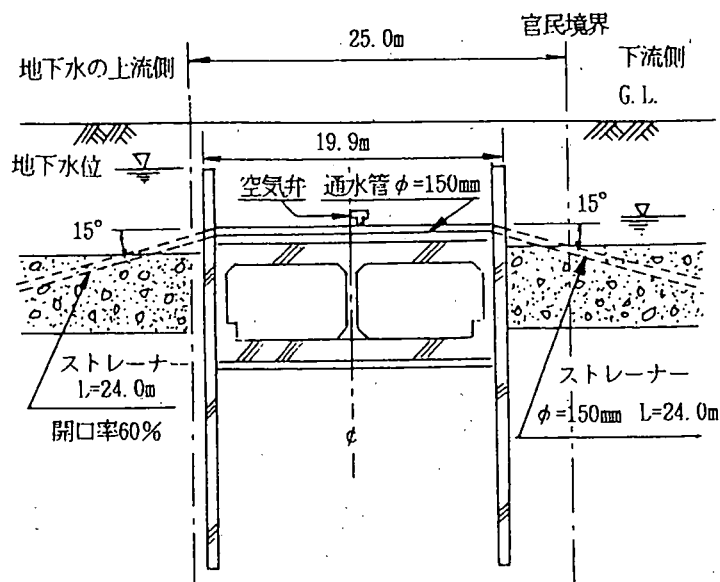


図-5 斜め通水管の設置イメージ図

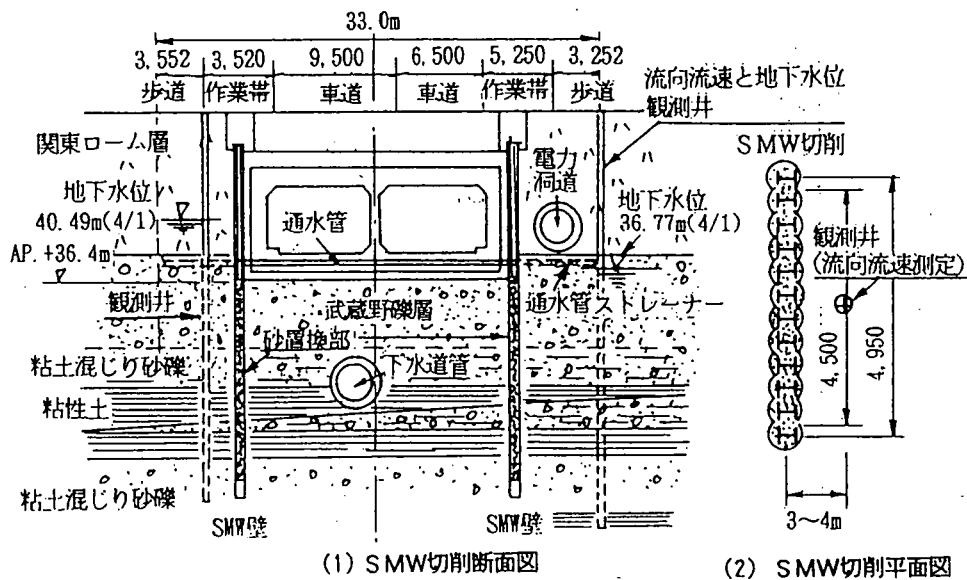


図-6 柱列式ソイル壁の切削と砂置換のイメージ図

対象工事及び対策工法の概要

施工事例番号；3

通水工法の分類；B-3

施工事例名	高速道路開削トンネル部における地下水保全対策	
Key Word	開削工法，通水性R C地中連続壁，本体利用，目詰まり，スクリーン，洗浄	
対象工事名称 及び概要	<p>工事名称：首都高速中央環状新宿線S J 12 工区</p> <p>工事概要：首都高速中央環状新宿線は，山手通りの道路拡幅事業に併せてその道路敷地下の空間を利用して構築する道路トンネルである。路線延長 11.1km のうちトンネル部の延長が約 10Km，最大土被りは 50m であり，都市内道路トンネルとしては例のない長大トンネルとして建設を進めている。本路線は，南北に横断することから，地下水系に与える影響調査・予測・評価を計画初期の段階から行っている。本工事は，地下水対策を必要とする区間のうち，渋谷区神山町の道路敷地下換気所付近（以下神山町換気所）を対象としたR C地中連続壁の築造工である。（工区延長約 220m）</p>	
工事区分 工期	高速道路開削トンネル，R C地中連続壁構築 「1997 年～ 」	
通水対策工法	①目 的	<p>神山町換気所付近は，地下水が本路線を横断していることが明らかで，遮断すると社会的な影響が大きいと想定された（水位低下による障害や湧水池への影響等）。特に，東京礫層は地下水量が多いことから，この層の遮断の影響を軽減する目的で対策工を施工した。</p>
	②土留壁	<p>土留壁はR C地中連続壁であり，本体利用する。 壁厚 1200mm，連壁長 54～65m，</p>
	③復水工	<p>R C地中連続壁内に集水（復水）井を約 30m の間隔で設置し，両井戸を地中で連結することによって，上流側の地下水を下流側に迂回通水させる方法を取っている。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・井戸間隔の設定法：スクリーンを通して流れる地下水の流速が地盤の目詰まりする流速以下となるように井戸間隔を設定。 ・井戸部（通水ボックス）：幅 1.5m×0.35mの矩形 ・スクリーン：ステンレス製の水平連続Vスロット構造 ・通水ボックスと連壁コンクリートはジベルにより一体化。 ・通水ボックス内への連壁コンクリートの流入防止工を設置。 ・スクリーン面をジェット洗浄することにより地盤透水性を回復。
地形・地質	地 形	台地（淀橋台），西側に目黒川，東側に旧宇田川
	地 質	<p>地表から，ローム層，ローム質粘土層，東京層砂層・粘土層，東京礫層，上総層の砂層・粘土層と続く。地下水量の多い東京礫層は，GL-26～30m にあり，層厚 4 m。連壁は上総層の粘土層まで築造。</p>

観測手法	路線横断方向に5本の観測井を設置しモニタリング中
地下水位変動予測	<ul style="list-style-type: none"> ・解析手法：準三次元FEM定常解析 ・地下水対策区間を流れる地下水の流量を算定。この流量を用いて、地盤の目詰まりを生じないように、井戸幅とピッチを設定。 ・影響予測 <ul style="list-style-type: none"> 無対策の場合：最大水位変動位置 上流側+2.0m, 下流側-4.3m 対策区間400mの場合：最大水位変動位置 上流側+1.2m, 下流側-2.0m
水理定数	透水係数：東京礫層 $k=1 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$
対策効果	現在（2000）、下流側のみの施工のため、通水施設全体としての効果は確認できない。井戸単体としての透水性の回復は確認している。
参考文献	1) 半野，久保田，山崎，松田：通水機能を有する地中連続壁の検討，土木学会第50回年次学術講演会講演概要集，1995 2) ㈱銭高組：通水連壁工法概要書，1997 3) 原田，宗像，松田：通水性地中連続壁の設計・施工，土木学会第53回年次学術講演会講演概要集，1998

概略構造図

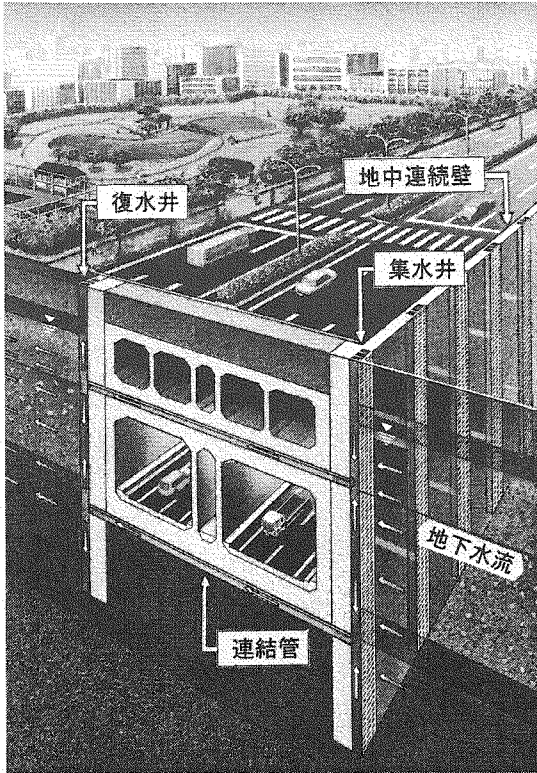


図-1 透水性RC地中連続壁の概念図

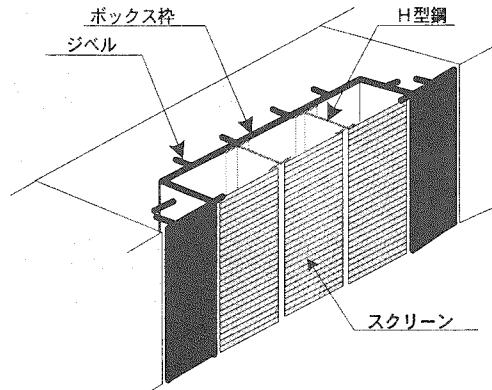


図-2 通水ボックスの概念図

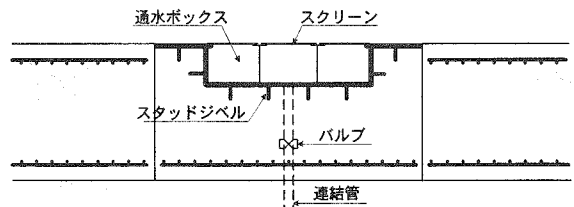


図-3 通水ボックス付き鉄筋かご断面模式図

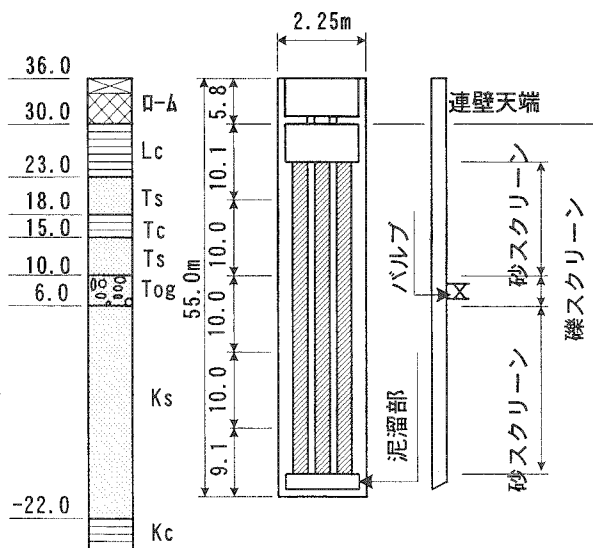


図-4 地質と通水井の設置範囲

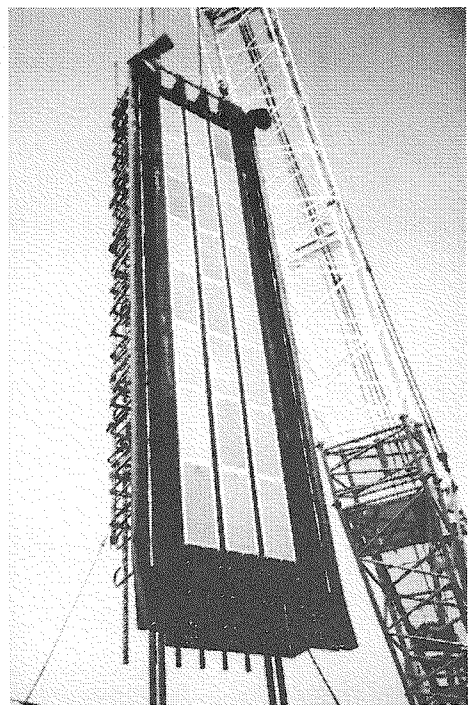


写真-1 通水ボックス付き鉄筋かごの施工状況

地下水位分布の変動

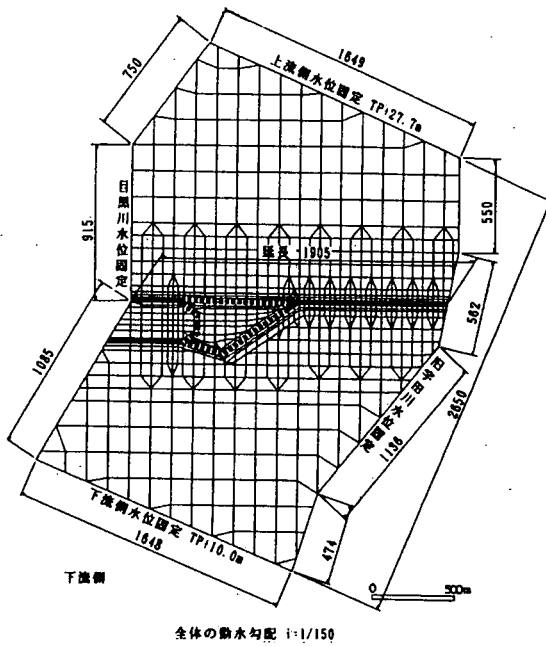


図-5 解析モデル（準3次元モデル）

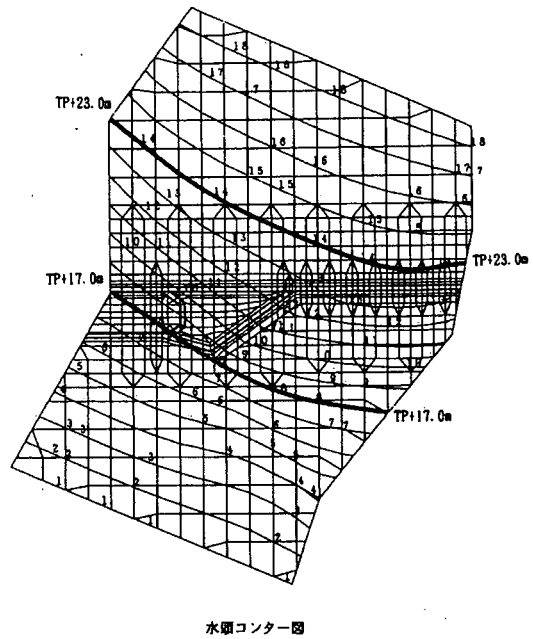


図-6 現況解析結果（水頭コンター）

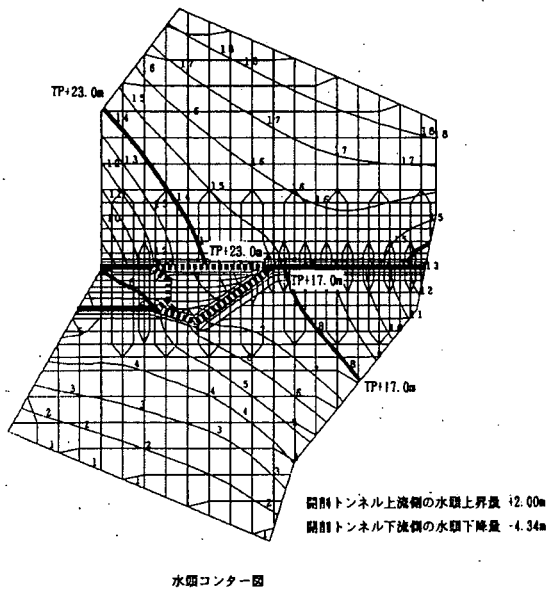


図-7 無対策の結果（水頭コンター）

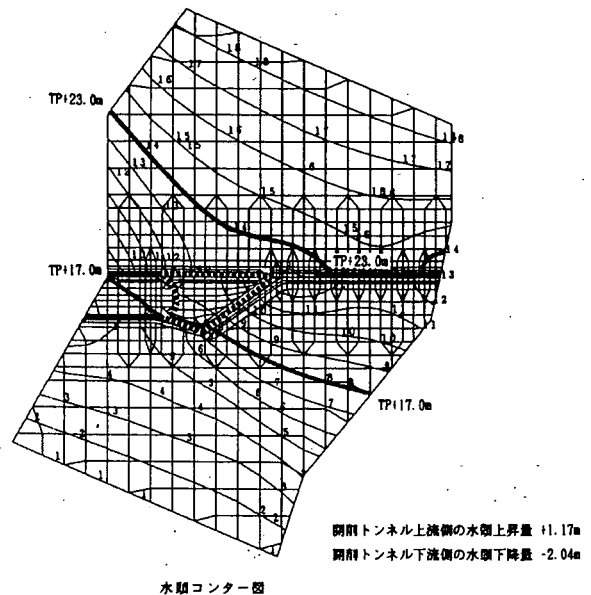


図-8 対策範囲 400mの結果（水頭コンター）

対象工事及び対策工法の概要

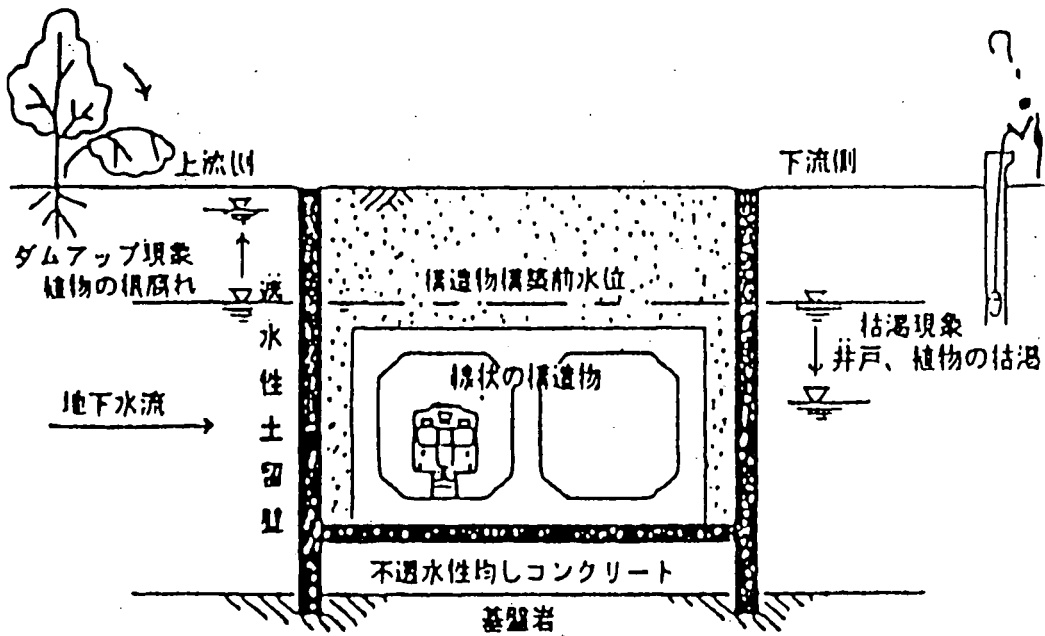
施工事例番号；4

通水工法の分類；A-1, C-1

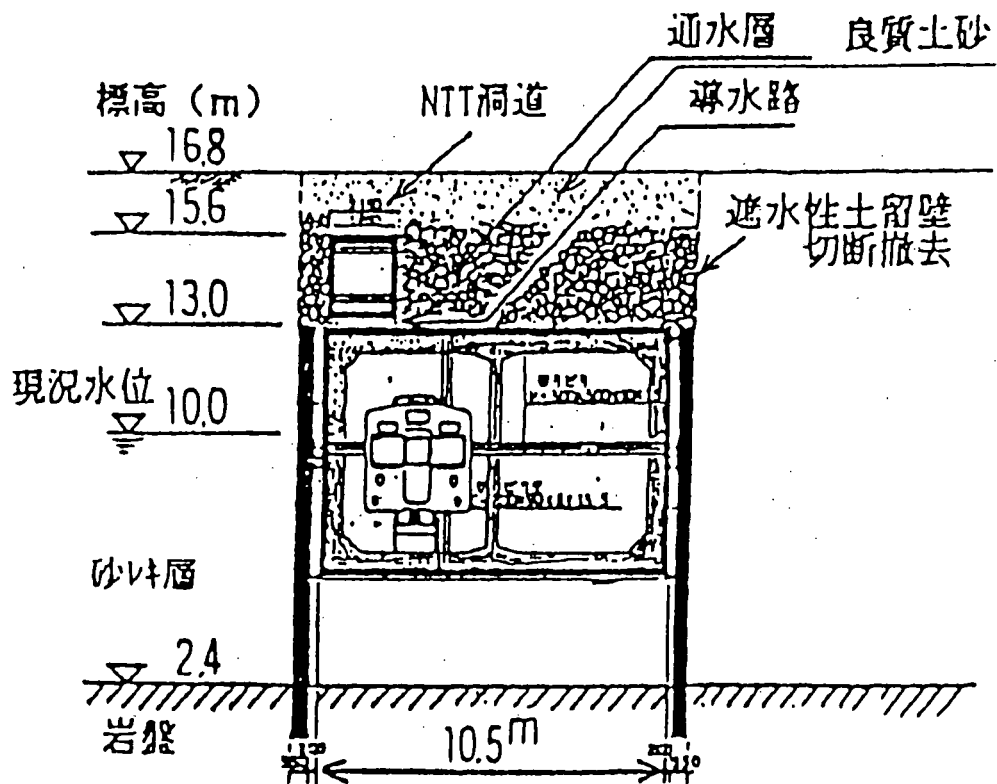
施工事例名	通水性SMWによる地下水保全対策				
Key Word	S M W，開削工法，地下函体，立体交差				
対象工事名称 及び概要	工事名称； J R仙石線地下化工事				
	工事概要； 仙石駅東部地区における道路との平面交差部を連続立体交差化（地下化）する工事				
工事区分 工期	延長約3200mの開削工法による地下函体を構築する工事のうち、一部区間において遮水性の高いS M W工法による土留壁を構築する区間は地下水流がせき止められ、上流側ではダムアップ現象、下流側では地下水枯渇が懸念された。そのため、工事完了後の復水を考慮して、函体構築後にS M Wを切断、削孔により撤去し、函体周辺を透水性の良い材料で埋戻し、通水層を設けた。				
工事区分 工期	開削工法，地下函体構築				
通水対策工法	開削工法の影響による地下水の地表面湧出、街路樹等植物の根腐れ、井戸の枯渇、植物の枯死などを防止する為に、上流側から下流側に地下水を通す対策として採用した。				
① 目 的					
② 土留工	掘削地盤等の条件から土留壁の形式は2種類用いられている。1つは地下湧水の少ない仙台東口駅～榴ヶ岡駅に適用した親杭横矢板工法、もう1つは地下湧水の多い宮城野～銀杏町に適用したS M W工法である。この内、S M W工法区間は遮水性の地下連続壁であることから腹水工法を採用した。				
③ 復水工	対策工法は、通水層厚を十分確保できる箇所において、S M Wを切断または削孔により撤去し、函体周辺を透水性（10-1cm/sec程度）の良い材料で埋め戻し、通水層を設けることにより地下水脈の流動保全を図った。 函体上部に通水層を設けるタイプ（2タイプ）と、函体上部に通水層を確保できない個所に適用するサイフォン方式の3タイプの通水方法を設けた。				
地質・地形	地形	表層付近に表土とローム層，その下位に第4世紀の河岸段丘層，さらに下位に新第3紀の凝灰岩類が分布している。			
	地質	新第3紀層は、凝灰岩やシルト岩、泥岩、砂岩、亜炭などから形成され、段丘層とは不整合に接している。また、この付近には断層があり、これを境に新第3紀層は東方へ急激に深くなり、これに伴い河岸段丘層も層厚を増している。			
観測手法	施工前から周辺地域に地下水位観測井戸を設けて継続的に地下水流況を観察				
地下水位 変動予測	解析手法	準3次元浸透流解析			
	影響予測	通水対策なし	最大水位変動断面	上流側	0.8m
				下流側	0.1m
	通水孔面積を10%以上大きくしても効果に大きな差がなく、実施工においてはこれを基に通水孔面積を10%とした				

水理定数	透水係数 埋戻し材 ; $1.0 \times 10^{-1} \text{cm/sec}$ オーダーの透水性材				
	埋め戻し材料の特性→	転圧回数 (回)	締固め度 (%)	透水係数 $K(\text{cm/sec})$	地盤反力係数 $K_{10}(\text{kgf/cm}^2)$
		1	89.7	4.81×10^{-2}	9.2
		2	91.7	3.76×10^{-2}	12.6
		4	95.5	2.86×10^{-2}	12.9
		6	96.2	2.42×10^{-2}	11.5
	8	97.1	2.56×10^{-2}	24.1	
対策効果の評価	評価	工事の影響と思われる地下水位変動は起こっておらず、対策区間の一部の施工を終了した時点で対策の効果は明らかでない。			
参考文献	1) 東日本旅客鉄道(株)東北工事事務所 生田雄康 他3名 ; 「工事報告 仙石線地下化工事における地下水保全対策」 雑誌土と基礎 43-4, April 1995 2) 西垣 誠 ; 地下水に関する影響評価手法, 雑誌基礎工, Vol. 20, No. 11, pp. 25~31, 1992 3) 鈴木 孝之 他3名 ; 埋戻し材料の透水試験, 第28回土質工学研究発表会, pp. 2221~2222, 1993. 4) 縄田 晃樹 他3名 ; 透水性を考慮した埋戻し材料に関する一考察, 土木学会第49回年次講演会, 1994. 5) 大野 賢二 他3名 ; FEM準3次元浸透流解析を用いた地下水流況予測, 土木学会第49回年次講演会, 1994.				

線状地下構造物による地下水阻害状況



通水層による対策案



水位変動状況

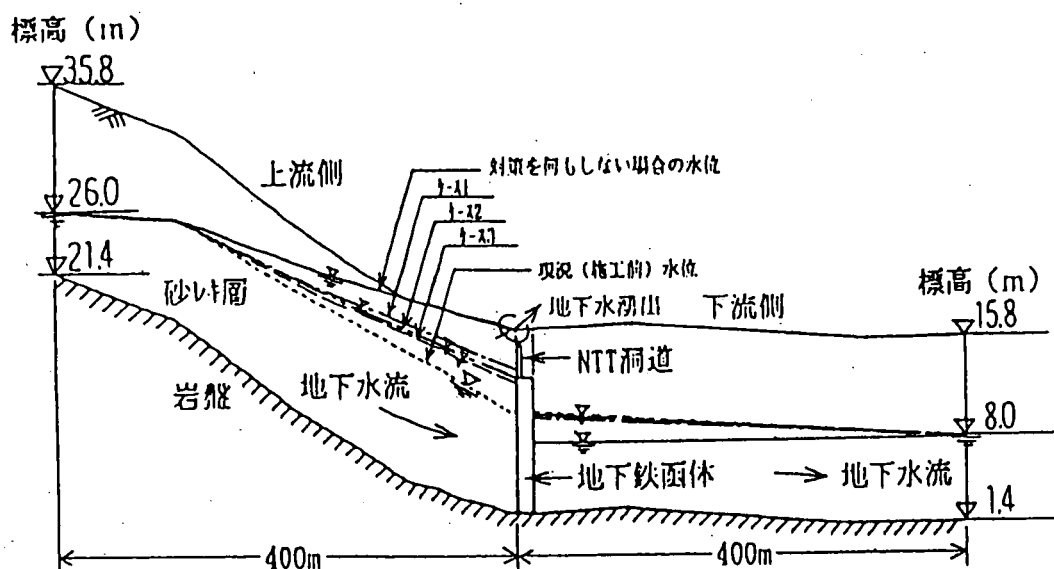
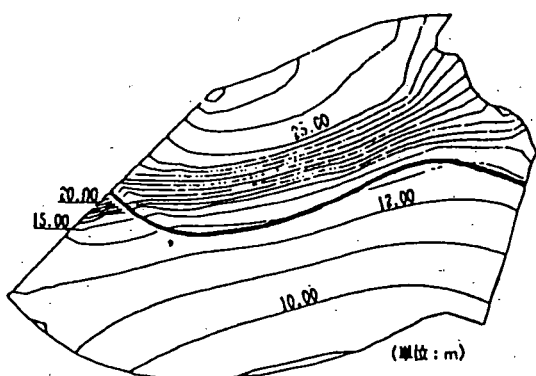
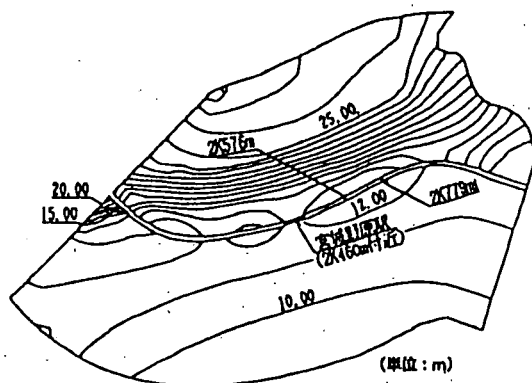


図4 水位変動状況

等水位線図



等水位線図 (函体施工前)



等水位線図 (撤去率 10%)

施工事例番号；5

通水工法の分類；B-1

施工事例名	阪神高架化地下部工事における宮水水脈保存対策
Key Word	宮水、基礎杭、地中梁、通水パイプ
対象工事名称 及び概要	工事名称：阪神本線西宮市内連続立体交差化工事の内土木関係主体工事 第3工区
工事区分・工期	鉄道高架橋 [H2.4～H14 年末（予定）]
通水対策	<p>目的と概要</p> <p>「宮水」を守るため、地下水観測体制をとるとともに、通水パイプ設置等の以下の対策を実施した。</p>
	<p>① 地下部工事の施工順序における対策</p> <p>鉄道高架化の仮線方式による工事は狭い場所での施工となり、通常全ブロックを鋼矢板で締め切り、地中梁を構築するが、鋼矢板による締切区間を最小限に抑え、ダムアップ現象を起こさないように地中梁を1つおきに完成させる千鳥施工で実施した。</p>
	<p>② 鋼矢板圧入における対策</p> <p>通常、鋼矢板の根入れ深さは背面土圧、水圧等の荷重から仮設計算により決定するが、鋼矢板下部からの地下水の回り込みによる揚水量を出来るだけ少なくする対策として、難滞水層まで根入れできる長さとした。また、鋼矢板圧入はアースオーガ併用工法とし、又圧入周辺地盤へ出来るだけ影響が出ないようにすると共に、圧入時の地下水の変動測定も実施した。</p>
	<p>③ I期・II期施工の取り合い部の対策</p> <p>I期・II期の接続部の土留め工は、I期工事側に土留壁を設置しておきその内部は、鋼矢板と一体化した均しコンクリートを打設し、地下水の止水対策として土留壁の打継部や鋼矢板との接続部を水膨張ゴム等により防水を行った。</p>
	<p>④ 下部対策工の実施</p> <p>今回の工事では基礎栗石を下部対策工として利用するため、鋼矢板内部全面に約30cmの厚さで敷き均した。均しコンクリートによる目詰まりが考えられたので、基礎栗石の上部には吸い出し防止シートを設置し、セメントペースト分の流出を防止した。</p>
	<p>⑤ 側面対策工の実施</p> <p>通常、埋め戻しは掘削土の流用や山土を使用して行うが、側面対策工として所定の深度まで単粒碎石にて埋め戻しを行い、その上部を水密性の良い真砂土で地表まで埋め戻した。単粒碎石と真砂土の境界には吸い出し防止シートを敷設した。</p>
地質・地形	<p>⑥ 通水パイプの設置</p> <p>修正された透水係数分布断面図及び地中梁掘削時に採取した掘削土から、透水係数が非常に良い個所については、地下水流下方向の地中梁に通水用の貫通スリーブを設置した。通水パイプは鉄筋に影響しない大きさであるφ50mmの塩ビ管を使用し、東西約2mピッチに設置した。</p>
	<p>地形：六甲山地の南側に属し、1000年ほど前は入海であって夙川の流砂で砂州となり、その後さらに夙川の大氾濫によって入海は流砂・礫が堆積し、地下水の通りやすい地層が形成された沖積平野であり、東西約2kmの帯状に分布している。</p>

地質・地形	地質：表層の沖積層（GL－5m付近まで）は花崗岩及び古生層に由来する砂礫層であり、この沖積層地下水の一部が「宮水」と称されている。この「宮水」滞水層下部の洪積層は浅海性、内湾性の塊の半化石を含む細砂、シルト、シルト質粘土層であり、その下部GL－18m～20m以下が伊丹砂礫層となっている。			
観測手法	工区全域にわたり、φ75～100mmの観測孔を67本設置し、本設工事着手前より地下水位・水質の継続調査を行っている。また、重要観測箇所については、補助観測孔を設置し、観測を行っている。			
地下水位変動予測	地下部工事を千鳥施工とし、工事期間中の遮水面積を最小限に抑える方法を採用することにより、恒久的な水位低下は無いと予想される。（工事前後及び工事中の観測で水位変動及び揚水試験による水量変動を確認した）			
水理定数	透水係数：沖積砂礫層（宮水滞水層） $5 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$ 以上 対策工施工90m区間での通水能力 現状での通水能力： $163,530 \text{ cm}^3/\text{sec}$ 対策工の通水能力： $140,139 \text{ cm}^3/\text{sec}$ 対策工の透水係数： $6.9 \times 10^{-1} \text{ cm/sec}$			
対策効果の評価		上流側水位標高	下流側水位標高	動水勾配
	工事前	TP+1.807m	TP+1.696m	$I = 1/270$
	工事中	TP+1.634m	TP+1.531m	$I = 1/291$
	工事後	TP+1.845m	TP+1.743m	$I = 1/294$
	評価：工事前後及び工事中の水位標高は降雨の影響によるもので、動水勾配に変動がないことから、地下水位は工事による影響は受けていない。			
参考文献	阪神西宮工事事務所「本設地下部工事における地下水対策」（平成9年12月）			

概略構造図 1/2

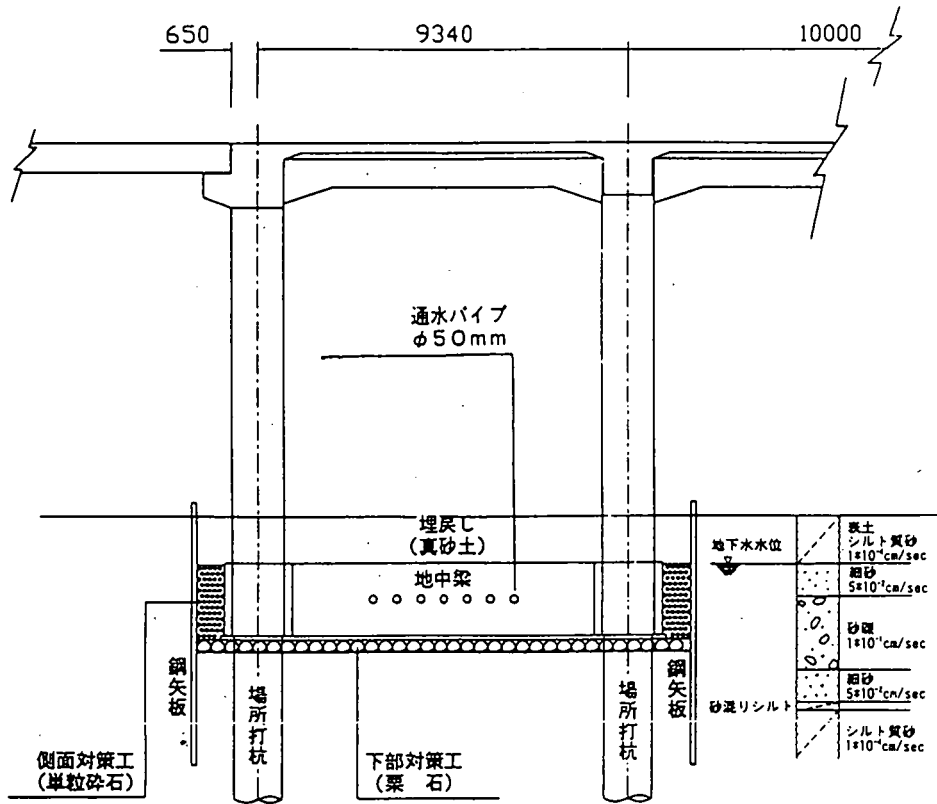
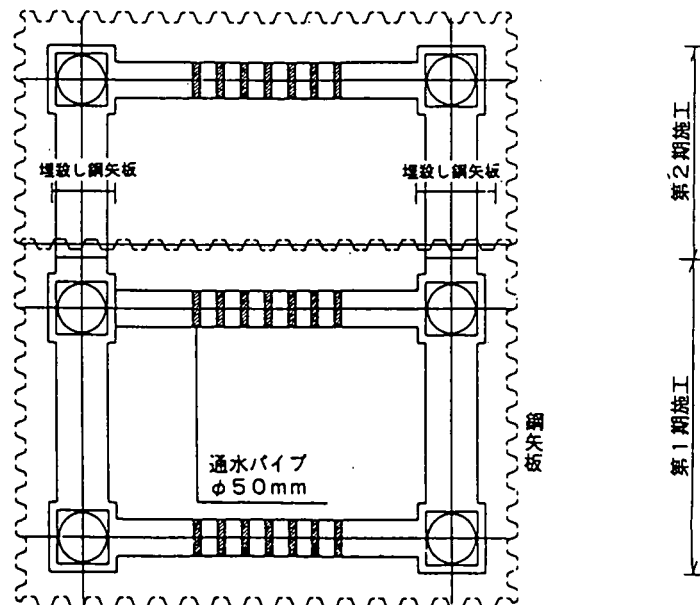


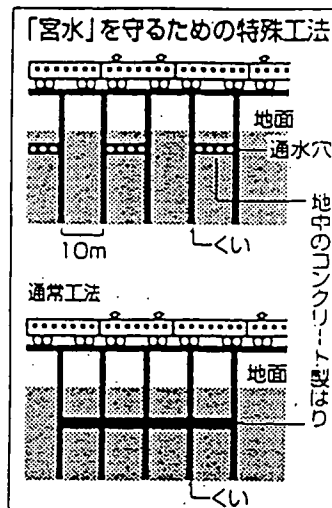
図-1



※鋼矢板は地下部工事完了後、引抜き・撤去する。
(但し、地中梁施工取合部の躯体下部の鋼矢板は埋殺しとする。)

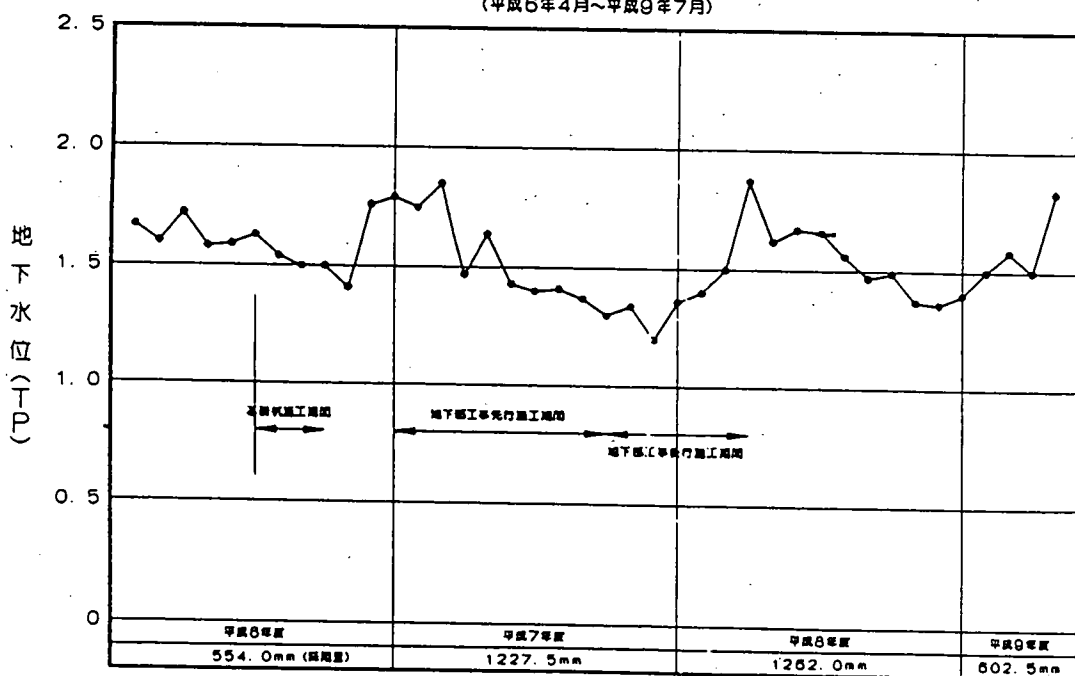
図-2

概略構造図 2/2



地下水位変動

地下水位変動図（一例）
（平成6年4月～平成9年7月）



施工事例番号；6

通水工法の分類；B-2

施工事例	神戸三宮地下鉄工事における地下水保全対策
Key Word	地下鉄、H鋼PC版遮水壁、通水管、ダムアップ、復水工
対象工事名称 及び概要	工事名称：高速鉄道・自 生田区下山手通・至 葺合区布引町間・ 三宮停留場及び地下線路工事（24 工区） 工事概要：工区延長 382m 掘削深さ 22～30m
工事区分・工期	地下鉄（開削工法） [S54.12.11～S59.10.31]
通水対策	
①目的と概要	周辺井戸の枯渇対策として掘削構内側より滞水層に水抜き穴を設け、背面地下水の低下を計る対策をとった。
②地下水位 変動と対策工	地下水位の変動が連続土留壁築造後、どの時点で発生するか不明であったので、水位観測孔で地下水位の計測管理を行い、ダムアップ現象が顕著に発生した時点で対策工を実施することとした。
③連続 土留壁工	<p>連続土留壁の施工進捗（昭和 57 年 5 月～11 月）にあわせて、土留壁北側と南側の水位観測孔（図-1 参照）における地下水位変動を見ると、図-2 に示すように、北側（上流側）では 11 月、12 月という渇水期にも関わらず 2.0m 程度の水位上昇が、南側（下流側）では 0.3m 程度の水位低下が見られた。</p> <p>北側の地下水位上昇により近接ビル地下室に漏水現象が発生し、南側では井戸涸れが生じた。そのため北側で上昇した地下水位を低下させる応急処置を行った。先にその実施概要を以下に述べる。なお、応急処置を含め実施した一連の対策工の工程表を表-1 に示した。</p>
④応急処置	<p>南側の水位低下に伴う井戸等への対処に対しては使用水を上水道に切り換え、北側の水位上昇に対しては掘削構内側から滞水層に水抜き穴（SGP100A）計 8 本（4 本×2 箇所）を設け、背面水位の低下を図る応急処置を昭和 57 年 12 月に行った。図-2 から分かるように上流側で急激に上昇した水位が降下に転じており、この応急処置で良好な結果が得られた。なお、応急処置で設けた水抜き穴は通水管設置後に閉塞した。</p>
⑤通水管設置	<p>応急処置で良好な結果が得られたことから、逆巻床版施工後の昭和 58 年 5 月、第 1 回目の処置として恒久的な水抜き孔を 4 箇所設け、背面水位の変化を観察すると同時に、水抜き孔から流出する地下水を 4 本の通水管（図-1 に示す NO.3,4,6,7）により下流側地盤内に放流し、水位低下を図った。その時の施工横断面図を図-3 に、詳細図を図-4 に示す。その結果、日当たりの平均通水量は約 60 ・ /day であった。一方、予測計算による通過流量は 130 ・ /day である。そこで、第 2 回目の処置として、7 月下旬に、さらに 4 箇所の水抜き孔と通水管（図-1 に示す NO.1,2,5,8）を増設し、計 8 本の通水管設備とした。</p> <p>表-2 は日当たり平均通水量を計測した値を示すが、8 本の通水管設備で予測通過流量を満足する結果が得られた。</p> <p>その後、設置した 8 本の通水管設備のうち、水涸れした NO.8 の通水管は閉塞し、また駅設備との関係で構内横断が出来ない NO.5 は NO.6 と連結させた。このため、最終的には図-1 のとおり集水用水抜き孔 7 箇所、放流用 6 箇所を構造物完成後も恒久的に存置することとし、内装仕上工事完成までに仮設備であった通水管を存置設備にやりかえた。恒久的に存置させた通水管の標準断面図を図-5 に示す。</p> <p>これら昭和 58 年 5 月及び 7 月に設けた通水管によって、図-2 に示すように、昭和 58 年前半の下流側の水位低下がなくなっている。しかも、近接ビルでの漏水量もほとんどなくなり、12 月～4 月の渇水期における地</p>

	下水位は上流側・下流側とも連続土留壁着工（昭和 57 年 5 月）以前の水準をほぼ維持している。																									
⑥効果 確認試験	<p>土木躯体工事完了後、存置した通水管設備が多雨期等に発生する一時的なダムアップ現象に対して有効に働くかどうかの効果確認試験を、昭和 59 年 11 月末と昭和 59 年 12 月中～末にかけて 2 回行った。これは、集水管と放流管とを連結しているため、放流側の土質・水位等による目詰まり等で水頭差が少なくなり、多雨期等に発生する一時的なダムアップ現象を緊急解消できなくなるおそれがある。そこで、地下鉄構内に集水側の水を水頭ゼロで放流し、短期間に背面地下水位を低下させてみた。</p> <p>図-6 の試験データから読み取れるように、通水管の開放を行うと 3～4 日間で 60cm 程度の急激な上流側背面地下水位の低下を行えることが判明し、5～10 月の多雨期対策がこの通水管設備でできることが確認できた。</p>																									
⑦地下水利用 と通水状況	<p>通水管設置後、通水管の地下水の一部を駅便所の洗浄用の中水道として利用することにした。駅構内の床を横断している 6 本の通水管の内、3 本（NO.1,2,3 の通水管）から分岐管を設け、洗浄用の貯水タンクの量が減るとその管から自動的に集水するようにしている。</p> <p>通水状況は、設置時に通水を確認するため計量メーターを設置したが、以降周辺建物からの苦情もないため経年的な測定は行っておらず、現在に至っている。なお、中水道量の計測は行っており、その利用は近年約 80 ・/日は確保されている。一方、通水管を通過している水量を平成 11 年 7 月～8 月の約 20 日間の短時間であるが測定した。その結果を表-3 に示す。これによると各管の通水量は少ないが、中水道量と合せた合計は約 95 ・/日で、設置当初の通水量 60～160 ・/日と比較すると季節によって大きな変動はあるが、概ね通水の効果は持続しているものと思われる。</p>																									
地質・地形	地形：扇状地形 地質：工区の 2/3 は、G L - 10m まで旧河川敷または旧洪水敷にあたるところの沖積砂礫層である。																									
観測手法	観測井戸																									
地下水位 変動予測	下記参考文献によると、原水位より 3m 程度のダムアップ現象が生じると予測された。																									
水理定数	透水係数：沖積砂礫層 $7.25 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ 通水管 1 本当たりの流量 1.5～35 ・/日																									
対策効果 の評価	<table><tr><td></td><td colspan="2">上流側水位標高</td><td colspan="2">下流側水位標高</td></tr><tr><td></td><td>効果</td><td>非対策時予測</td><td>効果</td><td>非対策時予測</td></tr><tr><td>工事前</td><td>—</td><td>—</td><td>—</td><td>—</td></tr><tr><td>遮水壁完了後</td><td>—</td><td>—</td><td>—</td><td>—</td></tr><tr><td>工事後</td><td>—</td><td>—</td><td>—</td><td>—</td></tr></table>		上流側水位標高		下流側水位標高			効果	非対策時予測	効果	非対策時予測	工事前	—	—	—	—	遮水壁完了後	—	—	—	—	工事後	—	—	—	—
		上流側水位標高		下流側水位標高																						
		効果	非対策時予測	効果	非対策時予測																					
	工事前	—	—	—	—																					
	遮水壁完了後	—	—	—	—																					
工事後	—	—	—	—																						
	評価：かなりの伏流水があったが、工事着手前よりダムアップの可能性とその対応策を検討していたため、その都度迅速に対応できた。工事の初期に応急対策を必要としたことはあったが、その後竣工後も地下水の流れを阻害するような問題は発生しなかった。																									
参考文献	1) 大林組「神戸三宮地下鉄工事記録」、S59 年 10 月 2) (財)大阪土質試験所（1981）「遮水性土留壁施工に伴う自由地下水変動解析」 3) 杉村孝雄,他 2 名「神戸市営地下鉄山手線の三宮駅建設に伴う地下水流動保全対策」：地下水地盤環境に関するシンポジウム'99 発表論文集、地下水地盤環境に関する研究協議会、P135～154, 1999																									

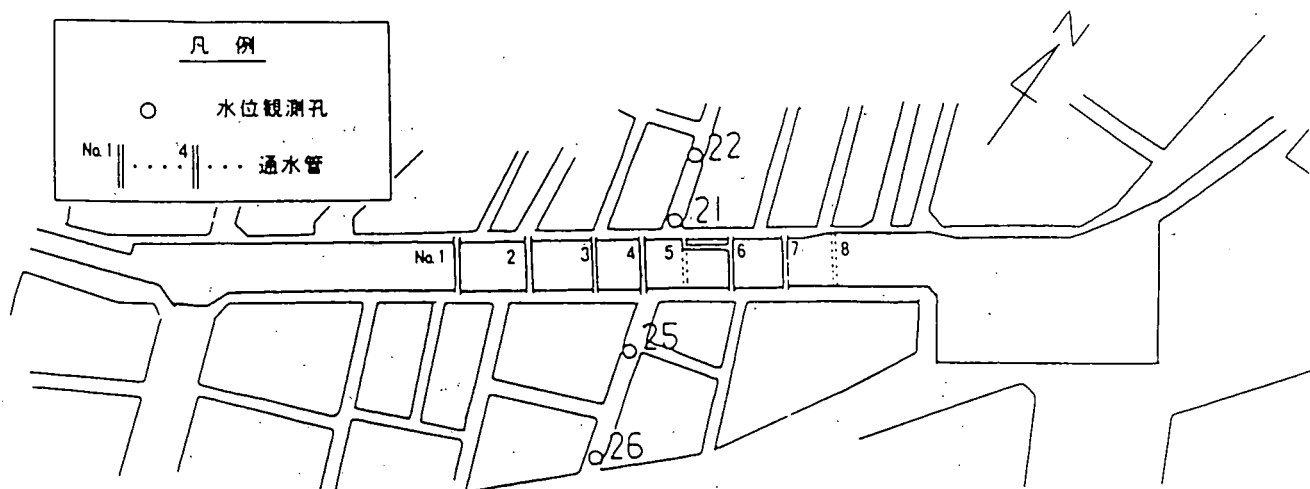
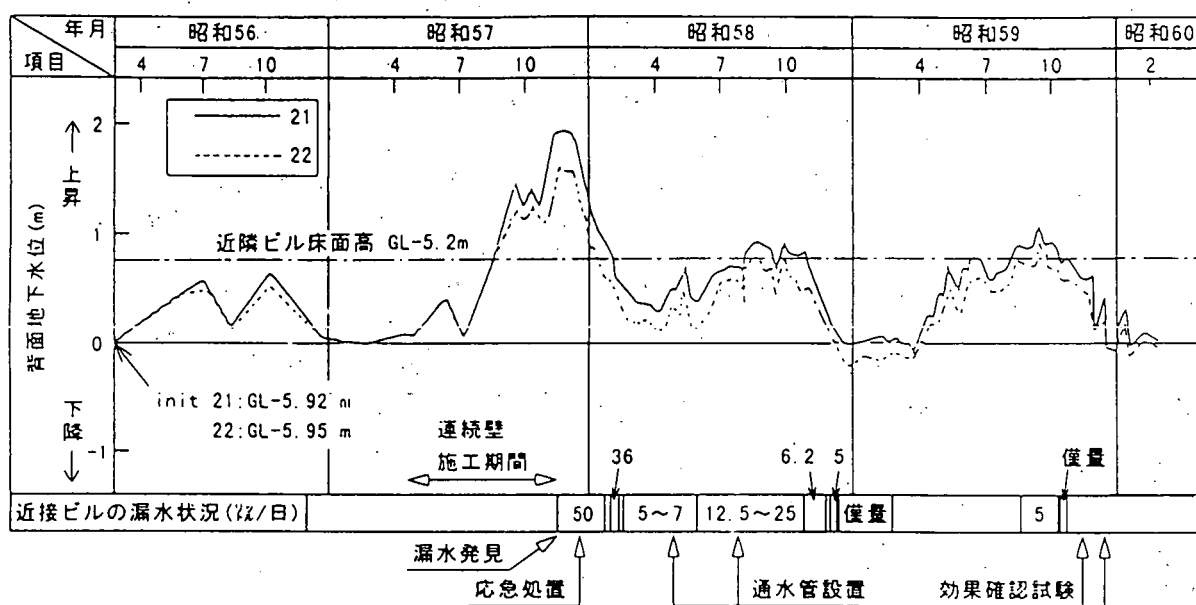
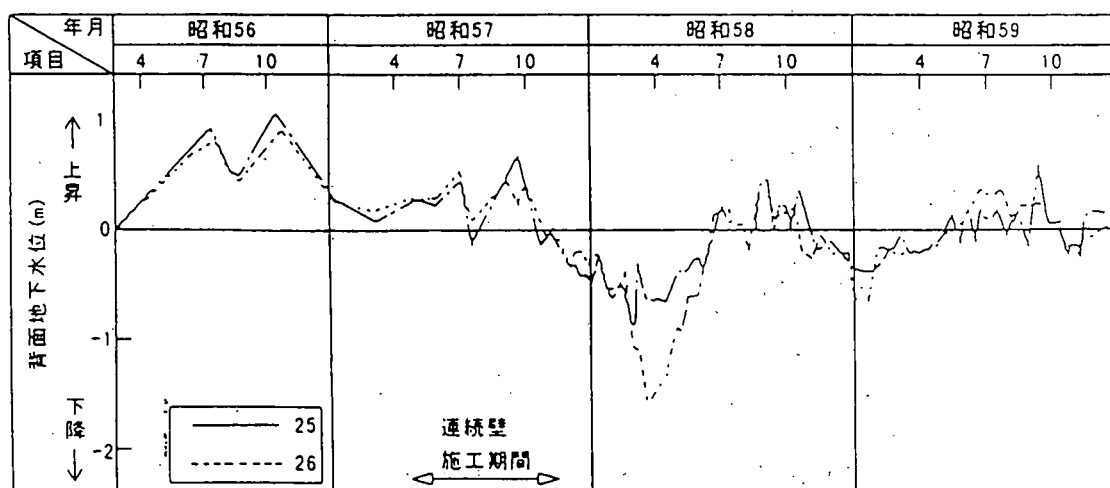


図-1 通水管と水位観測孔の平面位置図



(a) 北側(上流側)



(b) 南側(下流側)

図-2 土留背面 地下水位変動量の経時変化

表-1 工事工程と対策工

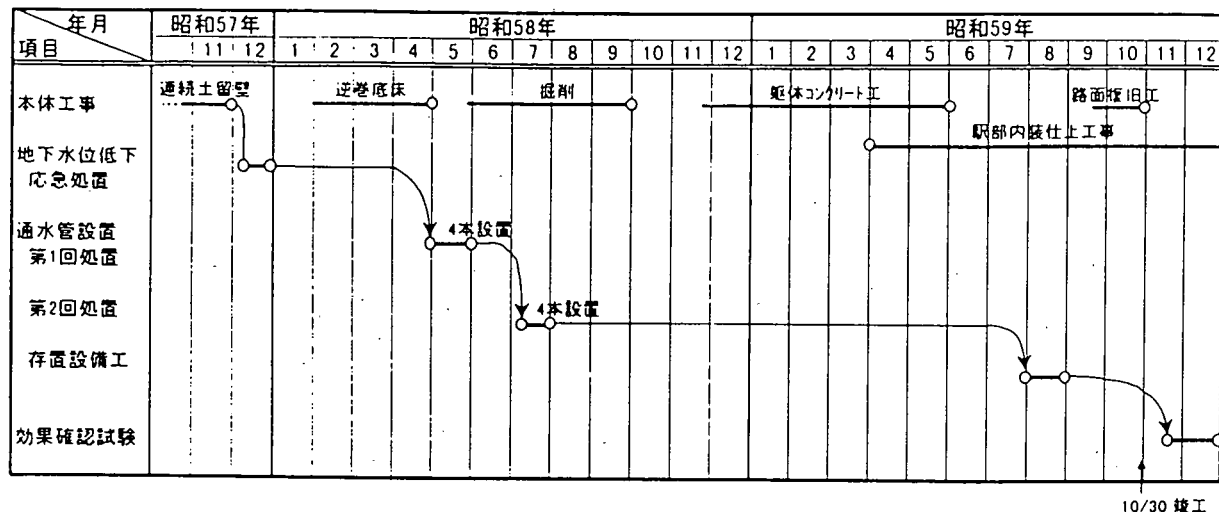
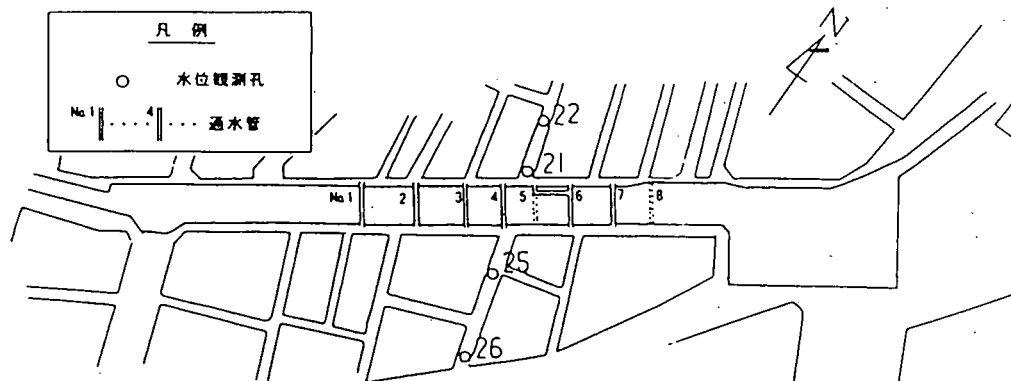


表-2 日当たり平均通水量

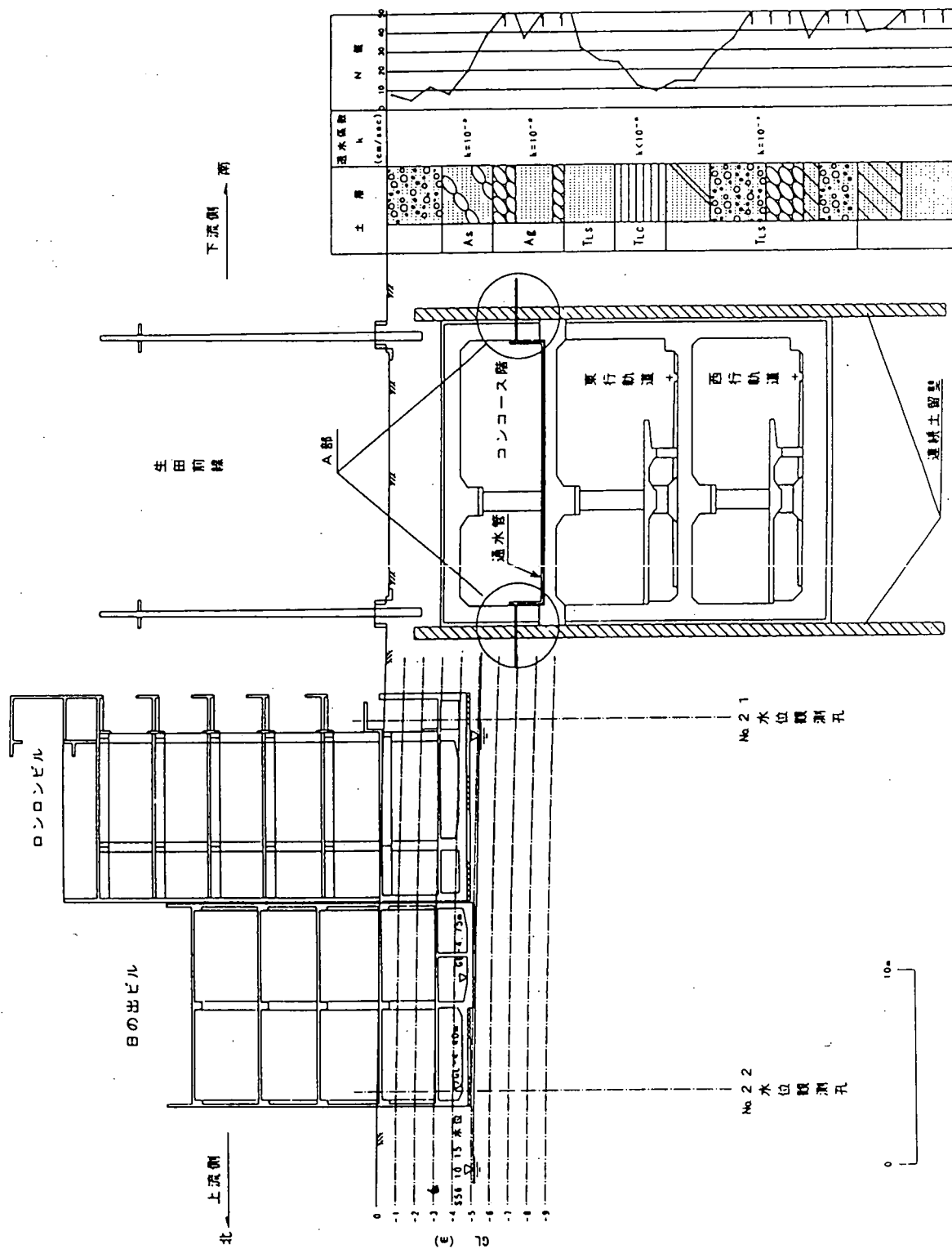
流量 単位: m^3/day

通水管 No.	設置場所	昭和58年								昭和59年		
		5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
1	ML12 ⁰ 14 ⁴ 100			12.5	13.0	14.0	10.0	8.0	6.0	2.0	6.5	5.0
2	ML12 ⁰ 36 ⁴ 170				4.0	14.0	25.0	目詰り	目詰り	目詰り	2.0	1.5
3	ML12 ⁰ 54 ⁴ 270	9.0	16.0	18.0	24.0	26.0	25.0	22.0	35.0	15.0	16.0	16.0
4	ML12 ⁰ 68 ⁴ 170	7.5	24.0	25.0	28.0	27.0	30.0	27.0	18.0	15.0	17.0	17.0
5	ML12 ⁰ 80 ⁴ 870				4.5	25.0	30.0	25.0	13.0	9.0	8.5	10.0
6	ML12 ⁰ 96 ⁴ 050	17.0	15.0	21.0	27.0	28.0	23.0	25.0	17.0	12.0	14.0	15.0
7	ML12 ⁰ 106 ⁴ 420	10.0	8.0	5.0	3.0	4.0	3.0	3.5	16.0	9.5	7.0	9.0
8	ML12 ⁰ 126 ⁴ 540				8.5	8.5	12.0	10.0	水溜れ	水溜れ	水溜れ	水溜れ
流量の計		43.5	63.0	81.5	112.0	146.5	158.0	120.5	105.0	62.5	71.0	73.5

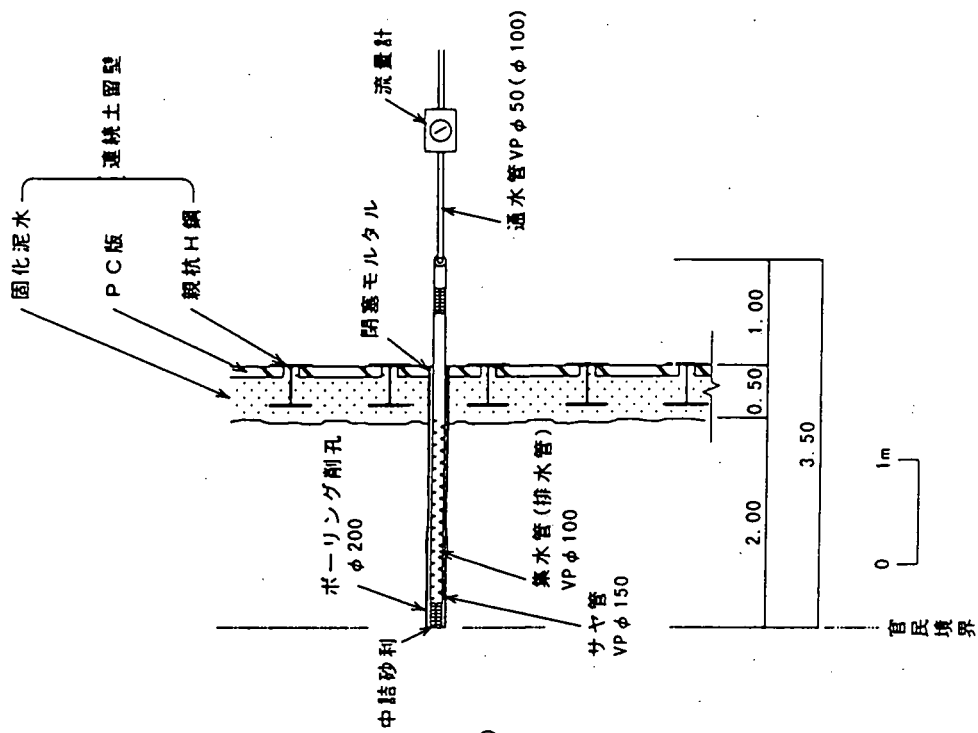
表-3 現在の通水流量



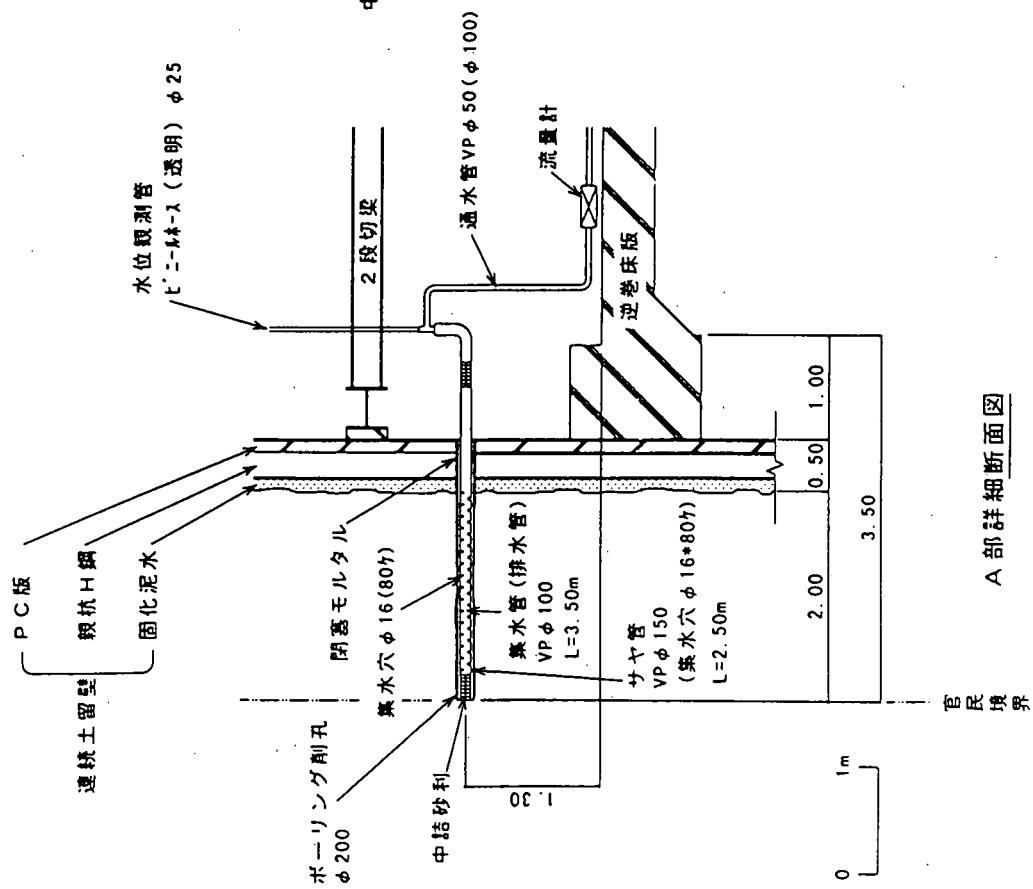
設置時 (昭和58~59) ($\text{m}^3/\text{日}$)	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5+6	No.7	中水道量	合計
	5~14	1.5~25	15~26	15~30	12~28	7~10	-	62.5 ~ 158
今回測定(平成11) 20日間の平均 ($\text{m}^3/\text{日}$)	6.7	1.9	0.1	0	5.5	0	83	97.2



図一3 通水管設備の施工横断面図



A 部詳細断面図



A 部詳細断面図

図一 4 通水管設備の施工詳細図(仮設備)

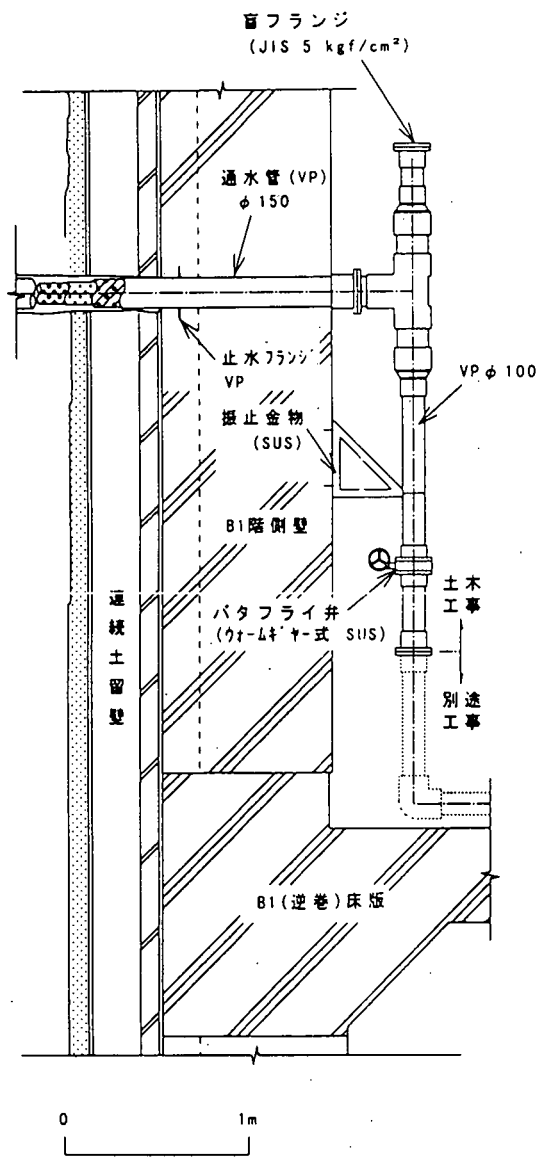
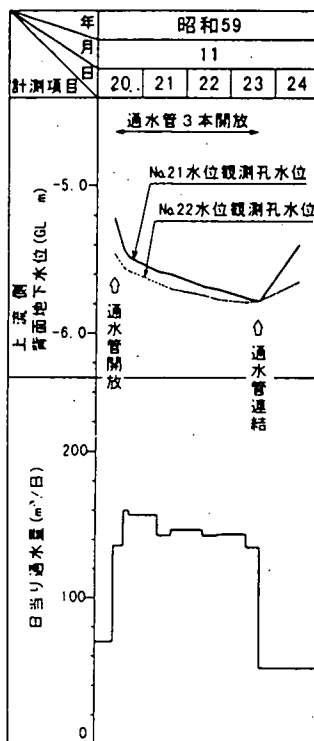


図-5 通水管設備の標準断面図
(存置設備)

(A) 第1回



(B) 第2回

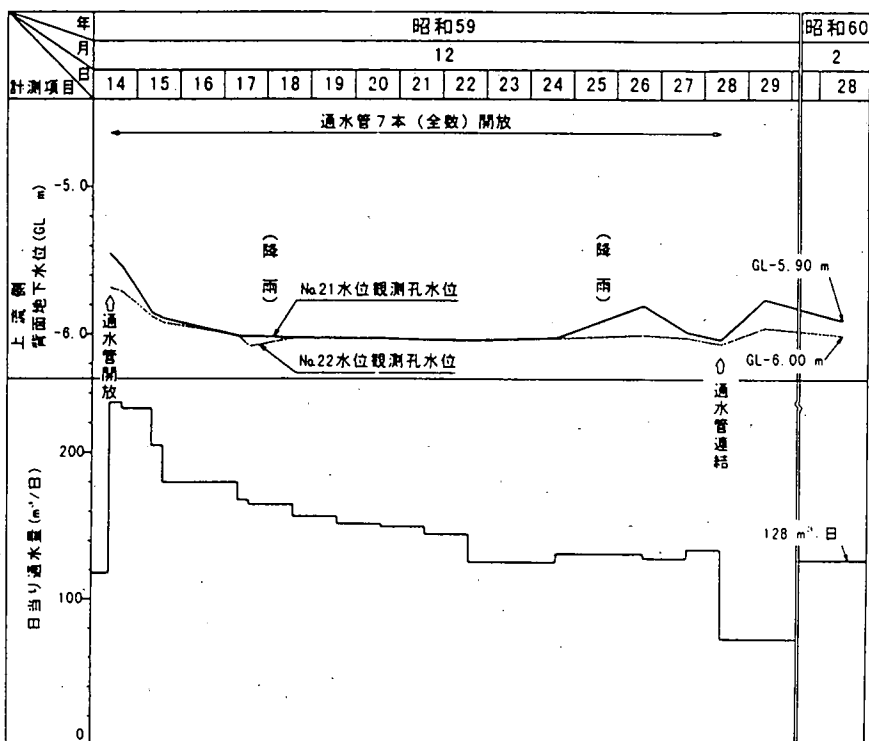


図-6 通水管開放 試験結果

施工事例番号；7

通水工法の分類；C-1

施工事例名	福岡市高速鉄道2号線工事（東公園工区）における復水対策
Key Word	地下鉄、H鋼PC版遮水壁、碎石透水層、復水工
対象工事名称 及び概要	<p>工事名称：福岡市高速鉄道2号線地下一般部工事（東公園工区）</p> <p>工事概要：工区延長 535.85m 掘削深さ 15m</p> <p>当東公園工区沿線の地下水は、古来名水として市民に親しまれ、水量も豊富で生活用水の一部として使用されていた。この水を守るため、工事完了後の復水を考慮して、構築上床版より上の土留壁は撤去し、埋戻しには通水をよくするため碎石を使用した。</p>
工事区分・工期	地下鉄 [S54.3.31～S56.10.30]
通水対策	<p>目的と概要</p> <p>地下鉄工事竣工後の付近民家（下流側）にある井戸への地下水供給を確実にするため、埋戻し材料に碎石を使用するなどの工法を採用した。</p>
	<p>①山留め工</p> <p>止水性に優れ、撤去可能な土留工法を選定する必要があった。そこで、ベントナイト泥水を用いて溝形状に掘削し親杭（H鋼）を建込み、下部の存置部にはプレキャストコンクリート版を、上部の撤去部には鋼矢板を挿入しベントナイト泥水を固化する工法を採用した。</p>
	<p>②復水工</p> <p>土留壁の親杭は、構築完了後構築壁面を反力として盛替梁（コンクリート）を打設しその位置にて切断し、埋戻し完了後に上部の鋼矢板を同時に引き抜いた。固化したベントナイト泥水は、アースオーガーにて削孔し砂と置換した。以上のごとく、構築上部の土留め工は全て撤去し、滞水層の埋戻し材料に碎石を使用して地下水脈の流動保全を図った。</p>
地質・地形	<p>地形：海岸（千代の松原）</p> <p>地質：均一な砂質土で地下水が豊富。古代三紀層の石英岩質頁岩の上部に沖積層の細砂、中砂および粘土が相互に堆積しており、GL-6～10mに存在する粘土層をはさんで上部滞水層と、主に工業用雑水に使用されている下部滞水層の二層を有している。</p>
観測手法	不明
地下水位 変動予測	不明
水理定数	不明

対策効果の 評価		上流側水位標高		下流側水位標高	
		効果	非対策時予測	効果	非対策時予測
	工事前	－	－	－	－
	遮水壁完了後	－	－	－	－
	工事後	－	－	－	－
	評価 地下水の流れは復水された模様				
参考文献	1) 福岡市交通局：「福岡市高速鉄道建設史」、平成 2 年 3 月 30 日 2) 深津保文、他 1 名：「報文・地下鉄根切工事における山留め工と排水の事例－福岡市高速鉄道 2 号線地下鉄東工区」、雑誌基礎工、P 85～88				

概略構造図 1/2

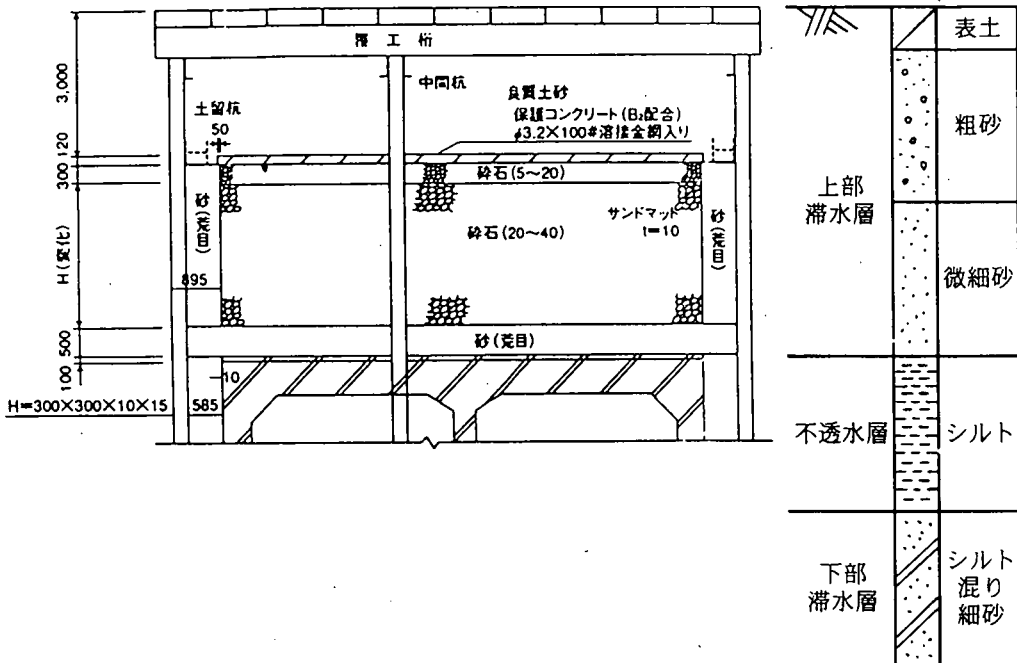


図-1. 復水構造図

図-2. 土質柱状図

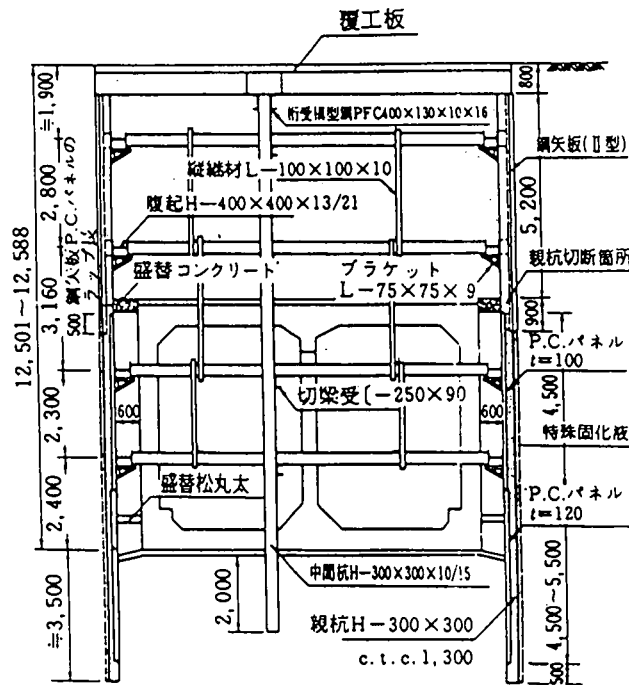
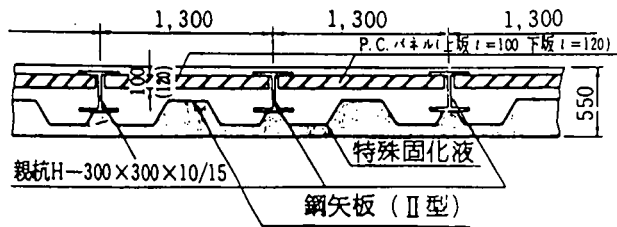
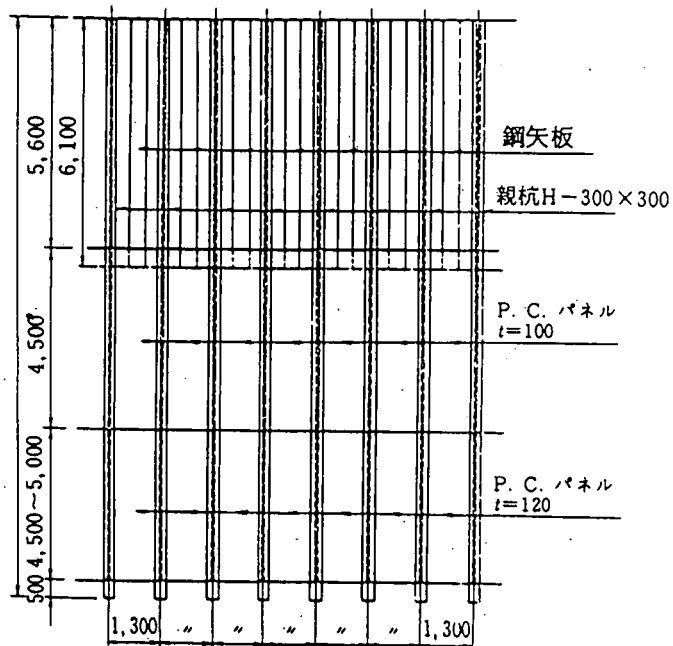


図-3. 特殊連続地中壁標準断面図

概略構造図 2/2



図－4．特殊連続地中壁平面図



図－5．連続地中壁正面図

地下水位変動の分布

施工事例番号：8 通水工法の分類：A-4

施工事例名	道路建設の切土区間における地下水環境保全のための復水工法の検討
Key Word	地下水の復水工法、集水・涵養井戸、井戸のづまり、水みち
対象工事名称 及び概要	現地の地下水状況を反映したシミュレーション解析により工法の妥当性を評価し、試験施工によりその有効性を確認し、恒久的な復水施設を設計・施工する際の理念について論述する。
工事区分工期	実際の切土工事を想定して原位置で試験掘りが行われた。
通水対策工法 ① 目的	切土区間の計画によって分断される自由地下水の量は、 $250\text{m}^3/\text{day}$ ($170\text{l}/\text{min}$) と算定され、「地下水環境の保全」の見地から道路建設後の地下水状況を建設前と同様の状況に維持するためには、この水量を何らかの方法で涵養させ復水する必要がある。
② 土留壁	柱列式地下連続壁を想定。
③ 復水工	<p>送水方式としては、①逆サイフォン案、②ポンプ案、③アースブリッジ案の3ケースを検討した結果、①逆サイフォン案を基本とした復水工法による地下水保全工法を考えた。</p> <p>また、地下水をいかに面的にかつ長期的に安定した状態で上流側から下流側へ浸透させることができるように、浸透面積を大きくする様々の手法を立案した。結果的には、10箇所の涵養井を100mピッチにする必要があると算定された。</p>
地質・地形	2つの河川により形成された高位、中位および低位の3つの段丘面が識別され、切土区間は主に中位段丘面が広がっている。地質は新第三紀鮮新世後期～第四紀洪積世の堆積物である大阪層群とこれを不整合に覆って分布する段丘堆積物に分けられる。
観測手法	定期の水位観測孔と自期水位計とを合計20本を、試験施工する100m切土区間の下流側に設けた。また、トレーサー追跡調査も実施された。
地下水位変動予測	<p>・解析に当たっては、降雨、蒸発散、直接流出、地下浸透までの、主として地表付近の水循環を表わす、「地下水涵養モデル」と帯水層内の地下水流動を表す「地下水流動モデル」を組み合わせたシミュレーションモデルによるものとした。</p> <p>・解析領域は、計画路線を中心として南北方向に約1500m、東西方向に約1700mの範囲をとった。</p>

	<ul style="list-style-type: none"> ・無対策時の地下水位低下は、計画ルートから 100m の範囲で 1.5m 以上、0.5m 以上の低下範囲はルートから 600m に及ぶことになった。 ・必要復水量は 250m³/day (170ℓ/min) と予測された。
水理定数	揚水試験による透水係数は、段丘砂礫層で 4.3×10^{-3} cm/sec、大阪層部の砂層では 1.6×10^{-3} cm/sec である。
対策効果の評価	<ul style="list-style-type: none"> ・ケース 1 (タイプ 1 の水平ドレーン方式) 試験開始とともに水位は、上昇に転じ、涵養に近い所では、0.7 から 0.9m の水位上昇が見られ、ほぼ 7 日目以後で一定の水位となった。 ・ケース 2 (タイプ 3 のトレンチグラベルドレーン方式) 試験開始から全ての地表で水位上昇が見られ、2～3 日目以後でほぼ一定水位になった。ケース 1 より復水効果の大きいことが認められた。 ・「点」で涵養させるケース 1 よりも「面」で涵養させるケース 2 の方が大きな涵養効果の期待できることが明らかになった。
参考文献	<ol style="list-style-type: none"> 1) 土質工学会：根切り工事と地下水, pp.313～317, 1991. 2) 西垣誠：被圧水及び高地下水位地域での基礎工の設計と施工の問題点, 基礎工, Vol. 18, No.8, pp.26～32, 1990. 3) 永井宏ほか：連続切土区間の地下水保全について, 第 19 回目日本道路会議論文集, pp.160～161, 1991. 4) 鎌田烈ほか：水文…地下水脈, 土と基礎, Vol. 41, pp.7～12, 1993. 5) 水収支研究グループ編：地下水資源・環境論, 共立出版, pp.229～271, 1993. 6) 村下、永井：人工地下水用井戸の目づまり, 日本地下水学会誌, 第 14 巻, 第 2 号, pp.11・14, 1972.

図-1 地下水保全工法の概念 (1 ニュット)

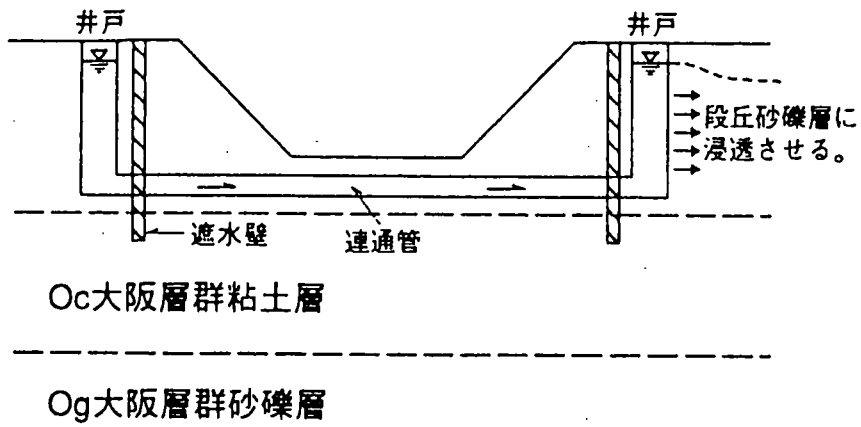


図-2 道路計画路線沿いの地質断面図

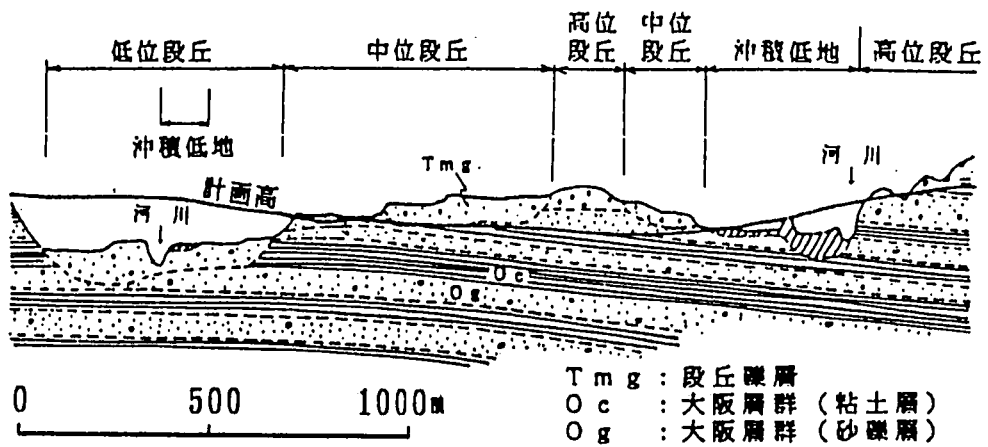


図-3 道路計画路線の平面図

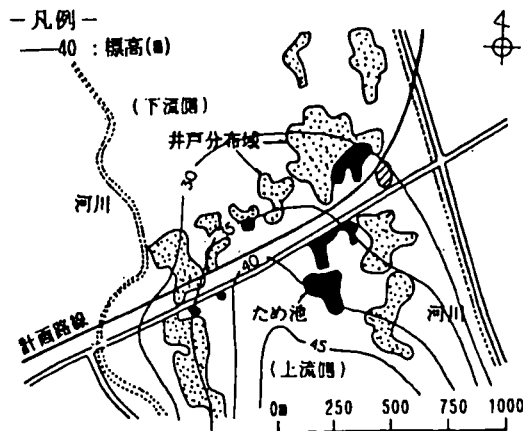
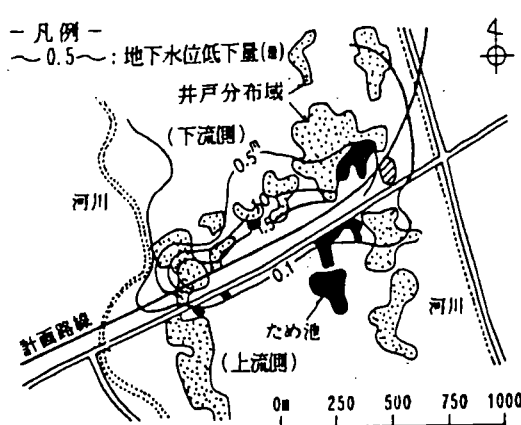
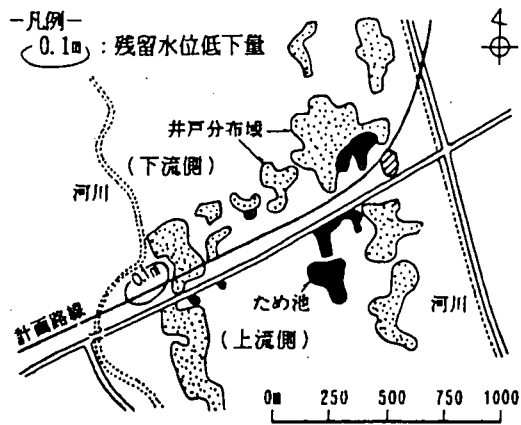


図-4 シミュレーションによる地下水位低下状況

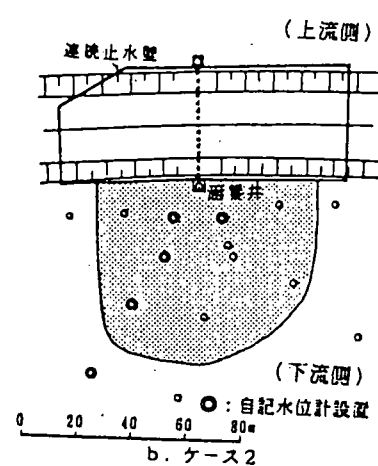
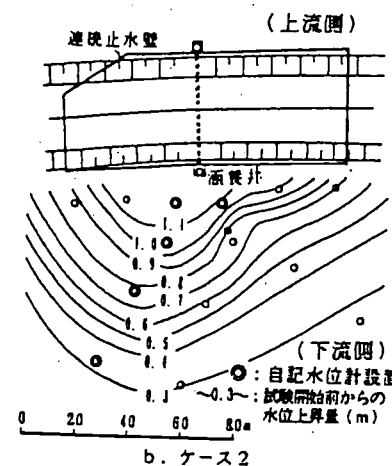
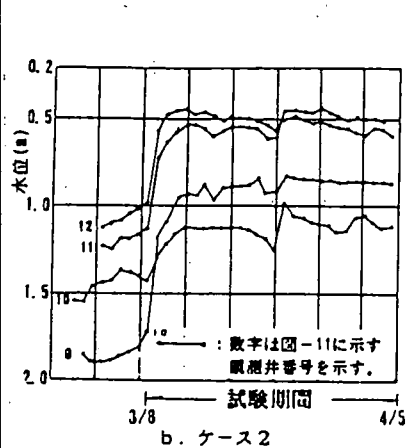
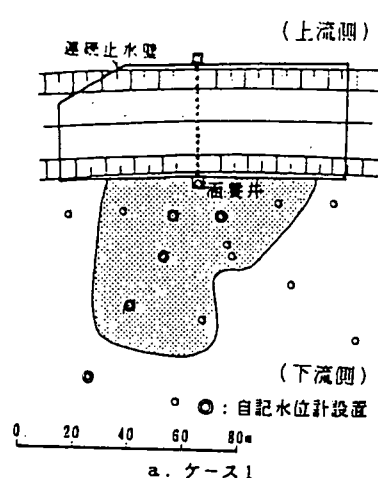
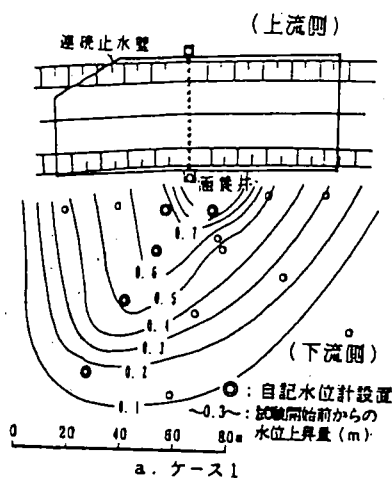
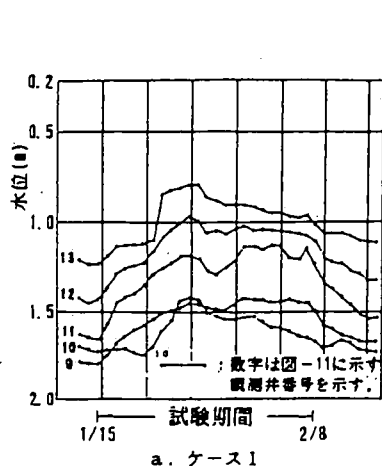


(無対策時)



(100mピッチ及び200mピッチで注水した場合)

図-5 試験期間中の地下水位変動状況



(試験期間中)

(1ヶ月後)

(トレーサの到達範囲)

対象工事及び対策工法の概要

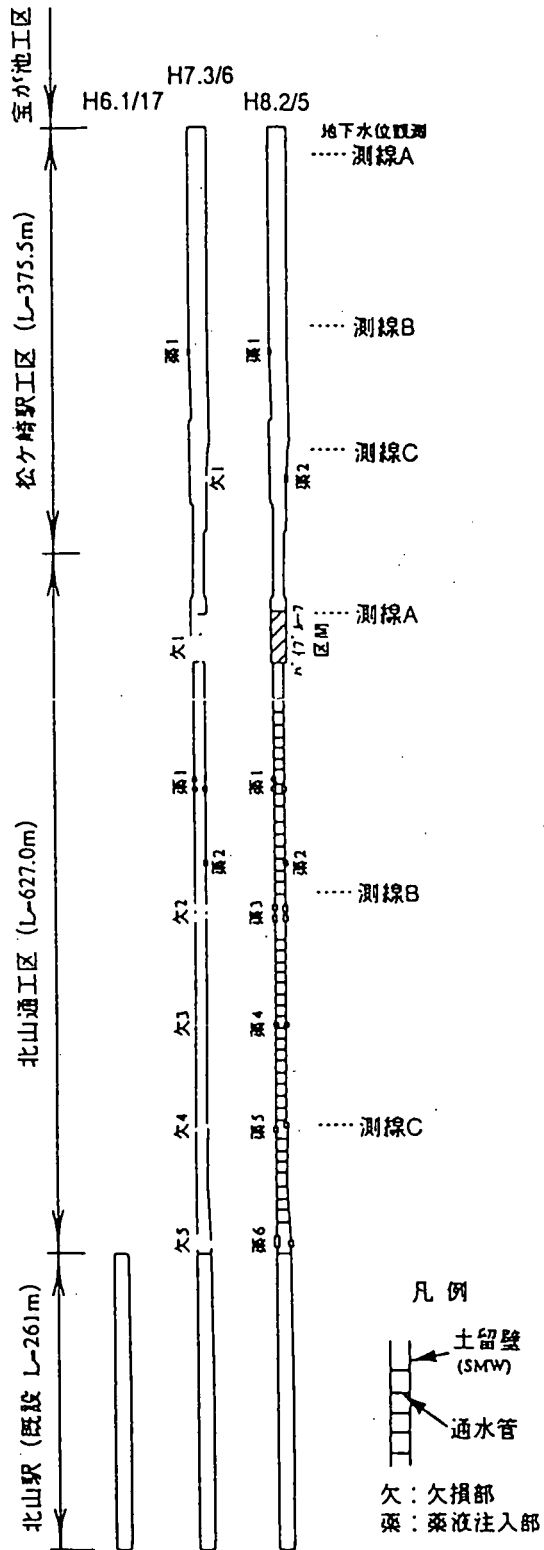
施工事例番号； 9

通水工法の分類； B-3

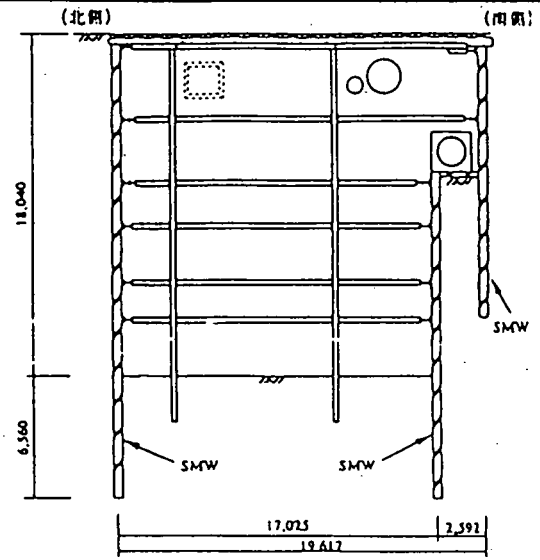
施工事例名	京都市地下鉄烏丸線における地下水保全対策		
Key Word	地下鉄， S M W， 開削， 地下水非遮断土留壁構築工法， S N F		
対象工事名称 及び概要	工事名称； 高速鉄道烏丸線（国際会館～北山間）建設工事（北山通工区） 工事概要； 延長：約1.0km， 幅：約10m， 19m， S M W：約19.6～24.5m 開削工法による地下鉄延伸工事で、施工延長は当該工区と隣工区を合わせて約1.0kmであった。施工に際しては一般部で幅10m， 駅部で幅19.6mのS M Wによる遮水壁を施し、深さは19.5m～24.5mとした。また、S M W欠損部に関しては薬液注入工法を用いた締め切りにより施工を行った。		
工事区分 工 期	地 下 鉄 工 事 [1993年3月～1997年5月；(4年2ヶ月)]		
通水対策工法 ① 目 的	賀茂川と高野川によって形成された透水性の良い扇状地堆積層を横断する開削工法である為、開削工法により施工する区間における地下水流動阻害の対策として通水工法を行なうものとした。		
② 土留壁	透水性の良い扇状地堆積層を横断する開削工法である為、止水性に優れた土留壁を採用する必要があったことから、遮水性の土留壁としてS M W工法を採用した。		
③ 復水工	施工段階から遮水壁に縦集水路を設置し、掘削内に通水管を渡して下流に流す後方で施工段階からの通水対策を行った。 通水対策工法は、当該工区の627mの内約500mに対して平均間隔約10mでS M W縦方向に上流側6m， 下流側12mの砂利置換えによるドレーン材φ600を設置し、水平方向に通水管φ200を設置した。当該工区において合計42セットを設置したが、隣工区は通水対策を行っていない。		
地質・地形	地形 地質	扇状地形 沖積砂礫層主体の複雑な堆積環境	
観測手法	観測を行うために、工区全域に渡り、掘削径 φ150mm， 深さ 20mの観測孔を36本設置し、観測を行った。		
地下水位 変動予測	解析手法	準3次元F E M定常解析	同定計算と予測計算の差で評価
	影響範囲	上流側	最大水位上昇 3m
			水位上昇範囲 400m (1m以上の水位上昇)
		下流側	最大水位低下 5m
		水位低下範囲 850m (2m以上の水位低下)	

水理定数	透水係数 沖積砂礫層； $1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-2}$ (cm/sec) (単孔式透水試験より) 通水管一本当たりの流量 約 $0.10 \sim 0.18 \text{ m}^3/\text{min}$				
対策効果の評価		上流側水位標高		下流側水位標高	
		効果	非対策時予測	効果	非対策時予測
	工事前	66m		64m	
	SMW完成後	67m	69m	63m	58m
	工事後（通水中）	67m	69m	64m	58m
	評価 通水後の下流側の地下水低下が少ない。				
参考文献	1) 出口 博一，他4名「京都市地下鉄烏丸線における通水工法を用いた地下水変動低減対策」；地下水地盤環境に関するシンポジウム'96発表論文集，地下水地盤環境に関する研究協議会，pp.123～134.1996 2) 市原 実 編著（1993）：大阪層群，創元社，p103. 3) 田中重機建設(株)（1996）：S.N.F.（Subterranean water Nature Flow）工法パンフレット.				

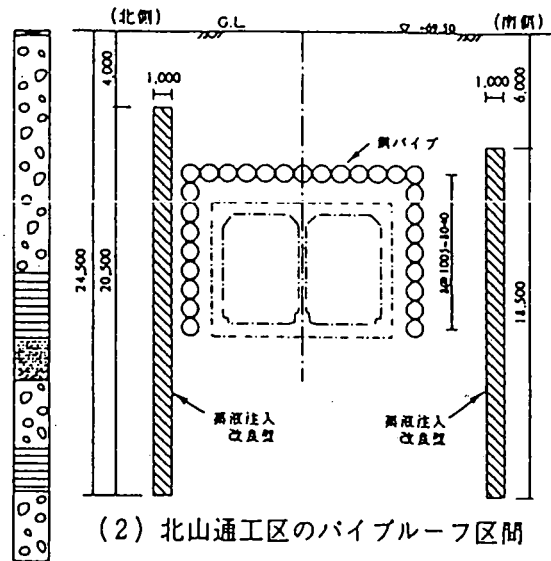
概略構造図 1/2



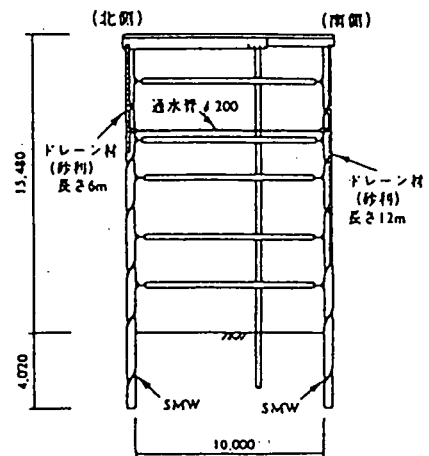
遮水状況の平面図



(1) 松ヶ崎駅工区



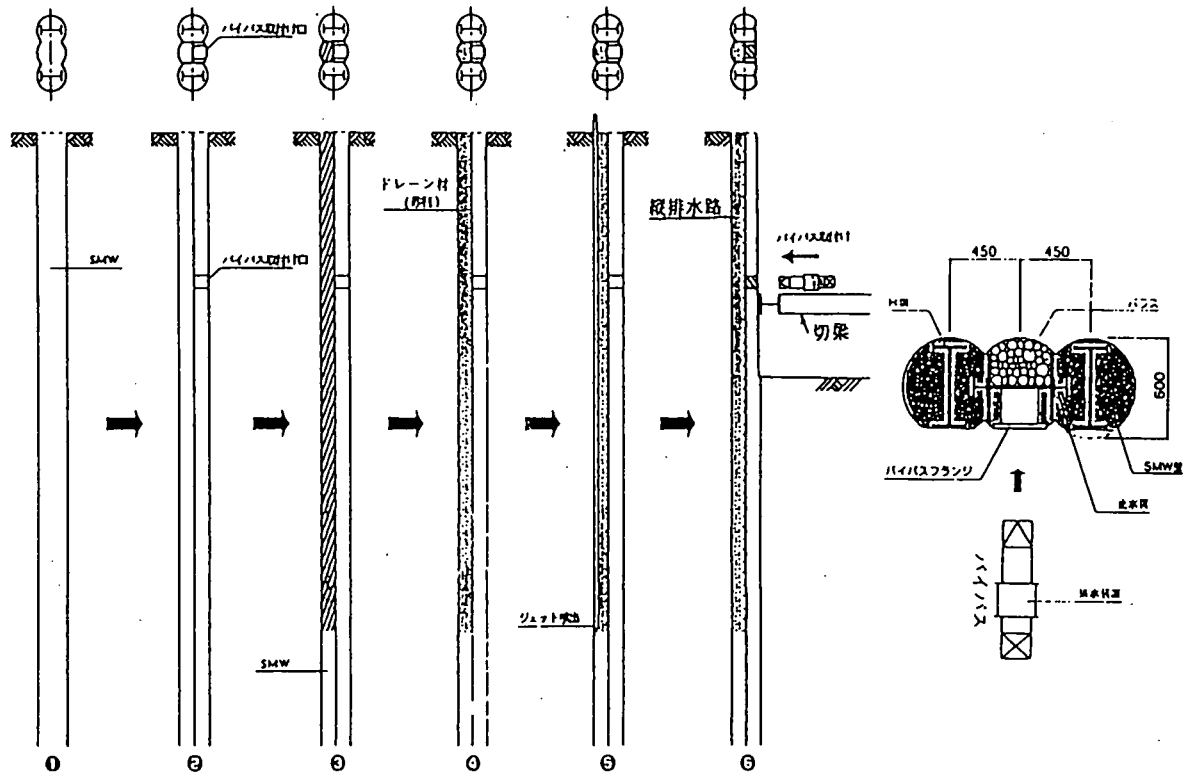
(2) 北山通工区のパイプルーフ区間



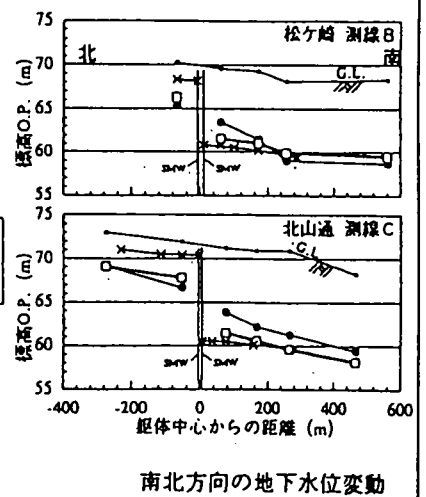
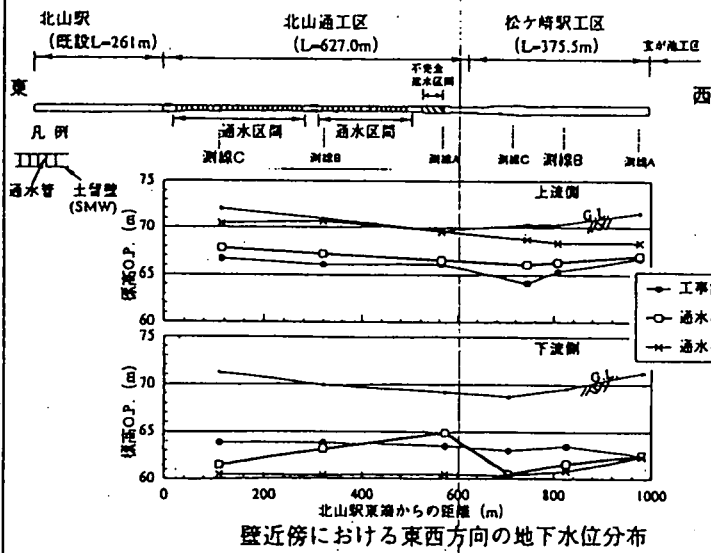
(3) 北山通工区の一般部

遮水状況の横断面図

概略構造図 2/2



地下水分布の変動



4.2.2 施工事例にみる問題点と課題

(1) 工法選択の条件

地下構造物の建設によって周辺地盤中の地下水位に影響を及ぼし、つぎのような現象が起こることは、以前から知られていた。

- 1) 掘削側に湧出する地下水を汲み上げることによる周辺地下水位の低下
- 2) 地下水流動阻害による地下水流上流側水位の上昇と下流側水位の低下
- 3) 地下水位低下にともなう軟弱地盤の沈下、井戸涸れ、水質変化、植物枯れ等
- 4) 地下水位上昇にともなう周辺構造物地下室への浸水や構造物の浮き上がり
- 5) 地下構造物側壁に及ぼす水圧の変化

延長の長い地下構造物を建設する工事の増加に伴い、環境への配慮と相まって、2) の地下水流動阻害による地下水流上流側水位の上昇と下流側水位の低下に対する対策工を講じる必要性が増している。こうしたことから、この現象に対する問題意識が最近高まっている。しかしながら、対策工を実施した施工事例はそれほど多くなく、本委員会で施工事例をまとめた表 4.2.2 の 9 件程度である。

この表の工法分類欄は、3.設計で示した図 3.3.2 集水・涵養方式による工法の分類と、図 3.3.3 通水方式による対策工法の分類に準拠している。土木工事の工法は、使用実績で有効なもの施工件数が多くなり、有効性が不十分なものは必然的に淘汰される。こうした意味で、収集した施工事例は 9 件と少なく新しい工法でもあることから、工法の優先順位付けはできない。

集水・涵養方式の件数は、土留め壁撤去 3 件、土留め壁削孔 2 件、集水・涵養機能付き土留め壁 3 件、集水・涵養井戸設置 1 件である。集水・涵養施設として最も有効と考えられる集水・涵養井戸設置の事例が 1 件と少ないのは、集めた施工事例の 9 件が市街地を含めた都市内工事のため、土留め壁と民有地の離隔が十分に確保できないことに理由がある。どの方式を選ぶかは、採用する土留め壁の種類に依存すると考えて良い。例えていえば、土留め壁撤去方式は鋼矢板土留めの場合が主であり、土留め壁削孔方式は R C 地下連続壁や S MW 壁といった工事後も地盤に残置する場合である。

また、通水方式は、通水層方式と通水管方式に分けられる。通水層方式は、帯水層と構築した地下構造物のそれぞれの深度との関係で、躯体の上部と下部の方式に分けられている。通水層方式は躯体下部が 1 件と躯体上部が 3 件、計 4 件であり、通水管方式は 5 件である。通水層方式は、透水性の良い材料で埋め戻すので施工の難易度はさほど高くないという利点があるが、通水量の把握に難点がある。一方、通水管方式はその設置技術の拙功が問われるが通水量の把握が容易であり、逆洗が可能という利点がある。通水方式の選択条件を挙げると、土留め壁の種類、構築する地下構造物の種類、帯水層との関係、施工の難易度などであろう。

(2) 事前予測と実測結果

表 4.2.2 の保全工法の特徴欄から、それぞれの事例で集水・涵養方式と通水方式の様々な組み合わせがなされていることが分かる。

ところで、周辺地盤中の地下水への影響を少なくするためには、土留め壁の施工前または施工中から通水施設を設けて通水しておくのが最も好ましい。その理由は、土留め壁等による地下水位のダムアップ量・ダムダウン量が共に少なくなり、完成後の復水時間も短縮できるものと考えられるからである。実際にこの条件を満たして施工するのは難しいが、特筆で

きる事例として、掘削の途中から通水を行っている No.9 の施工事例を挙げることができる。

事前予測で注目している水理物理量は、地下水位と通水量に分けられる。地下水位に注目するケースは、遮水壁等による地下水位のダムアップ量・ダムダウン量を先ず計算し、つぎに復水対策後の地下水位を算出し通水施設の設置数を決める。また、通水量に注目する場合は、遮水壁等を設置する前の地下施設構築区間を流れる地下水量を先ず計算し、これを必要通水量として、通水施設の設置間隔を決める。

いずれの施工事例も事前予測と実測結果との比較が行われているが、観測井水位での判断が殆どである。対策工の効果は、工事前の状態に近い復水状況となることに他ならない。それには、かなり長い時間を要する場合が多いと考えられる。したがって、対策工法の効果을正確に判定するには、工事完了後の観測期間を十分にとると同時に、長年月に及ぶ恐れがある場合には観測態勢の整備が求められる。

表 4.2.2 地下水保全工法の施工事例のまとめ

No	施工事例名	工法分類	保全工法の特徴	事前予測と実測結果
1	半地下構造道路の地下水保全対策 (名古屋高速道路高速1号線、吹田～四谷間)	集水・涵養方式： 集水・涵養機能付き土留め壁 通水方式： 躯体下部通水管	床付け後の地盤に、横断方向はSMW区間で10m、CW区間が20mピッチで、縦断方向は壁内側に沿って、梯子状の暗渠を設置し、躯体完成後、SMW切削撤去し碎石置換。地下連続壁区間は予め20mピッチに設置した鋼矢板土留め(通水幅1.0m、碎石充填)を引き抜く。	準3次元FEM解析で対策工前後の地下水位予測を行う。竣工後の実測水位は予測値に至っていないが、回復傾向が認められた。
2	環8・井荻トンネル工事における地下水覆水対策 (東京都杉並区内の延長1,263m道路トンネル)	集水・涵養方式： 土留め壁削孔 水平ストレナーパイプ 斜めストレナーパイプ 通水方式： 躯体底板内通水管	土留め壁背面側の用地幅余裕条件により、①壁を削孔したまま、②水平ストレナーパイプによる集水・涵養装置、③長い斜めストレナーパイプによる集水・涵養装置を設置した区間がある。 通水管のピッチは、①が30m、②が5～12mである。③は横断河川の河床下水みちを狙う。	準3次元FEM解析で対策工前後の地下水位予測を行う。竣工後の実測水位から、斜めストレナーパイプの集水・涵養効果が大きいたことが確認された。
3	首都高速中央環状線新宿線における地下水保全対策 (路線延長10.1kmの内、60%のトンネル区間)	集水・涵養方式： 集水・涵養機能付き土留め壁 通水方式： 躯体下部通水管	連壁施工と同時に、新開発の通水性地中連続壁を30～50m間隔に設置する。開発した壁は地山側にスクリーン加工したステンレス板を配し、壁設置後に連壁安定液泥水で目づまりしていたスクリーンを高圧水で洗浄して、集水・涵養井戸機能を持たせる。	準3次元FEM定常解析で通水流量を算定。平成12年現在、施工中のため、効果は今後の観測による。
4	JR仙石線地下化工事における地下水保全対策 (開削工法による延長3,200mの鉄道トンネル)	集水・涵養方式： 土留め壁撤去 通水方式： 躯体上部通水管 サイフォン形式通水管	トンネル躯体完成後、躯体上床版レベル以浅の土留め壁(SMW壁)を切断後、削孔により撤去し、躯体周辺を透水性の良い材料で埋め戻し、通水層を設けた。また、躯体上床版の上部層に通水層を確保できない場所では、サイフォン形式の通水装置を設置した。	準3次元FEM解析で、通水孔面積が10%以上で効果に差がないことを確認し通水孔面積を10%とした。工事影響の地下水位変動なし。要継続観測
5	阪神本線高架化地下部工事における宮水水脈保存対策 (高架橋下部工事中の対策と水脈保存例)	集水・涵養方式： 土留め壁撤去 通水方式： 透水性埋戻し層 地中梁内通水管	高架橋の基礎地中梁施工にあたり地下水への影響を考慮して、鋼矢板による締切り区間を千鳥施工。高い透水性区間は梁内に通水管設置。 また、鋼矢板締切内は30cm厚で栗石を敷き均し、地中梁構築後は所定深度まで単粒碎石で埋め戻し、その上部を真砂土で埋め戻した。	地下水流の上下流側観測井データを基に、工事前後の動水勾配比較を行い、差が少ないことを確認する。

表 4.2.2 地下水保全工法の施工事例のまとめ（継続）

6	神戸三宮地下鉄工事における地下水保全対策 （逆巻工法による地下停車場とトンネル382m）	集水・涵養方式： 土留め壁削孔 水平ストレーナーパイプ 通水方式： 躯体底板通水管	H鋼 PC 版遮水土留め壁の施工に伴い壁を挟んで地下水流のダムアップ・ダムダウン現象が確認された。応急措置として掘削構内側から壁を削孔し、集水・涵養水平ストレーナー管（長さ2.0m）を帯水層中に設置した。恒久対策では、躯体逆巻底板上に貯水タンクに繋がる通水管を設置。	予測計算の通水量は4カ所計で130m ³ /day、実測で60m ³ /dayであったので、水抜孔を4カ所増設した。工事後の地下水位は工事着工前に戻る。
7	福岡市高速鉄道2号線（東公園工区）における復水対策 （開削工法による延長536mの地下鉄トンネル）	集水・涵養方式： 土留め壁撤去 通水方式： 躯体上部通水層	工事区間の地下水は古東名水として市民に親しまれ水量豊富で生活用水に利用されている。工事完了後の復水を図るため、土留め壁には深い残置部をH鋼 PC 版遮水土留め壁で、上部を撤去可能な鋼矢板壁で施工した。躯体上部の埋め戻しに砕石を使い、通水層とした。	現在施工中のため計測データは公表されていないが、西暦2000年現在、工事周辺の地下水は復水傾向を示す。
8	堀割道路建設に伴う地下水環境保全のための復水工法 （1000mを超える堀割道路区間）	集水・涵養方式： 水平ドレーン付きの集水・涵養井戸 通水方式： 躯体下部通水管	予測解析で地下水の浸潤面が堀割のり面途中に出るため連続地中壁で遮水壁を構築し、壁の外側に水平ドレーン付き集水・涵養井戸を設置した。 また、トンネル状ドレーンを遮水壁に沿って構築し、集水・涵養井戸につないだ区間もある。道路底板下に連通管を敷設して上下流の井戸をつなぐ。	地下水涵養と流動を組み合わせたシミュレーション・モデルで、必要復水量250m ³ /dayを計算し、100mピッチに集水・涵養井を設置。効果は後者のケースが大きかった。
9	京都市地下鉄烏丸線における地下水保全対策 （開削工法による延長1.0kmの地下鉄トンネル）	集水・涵養方式： 集水・涵養機能付き土留め壁 通水方式： 切梁懸架通水管躯体下部通水管	扇状地堆積層を流れる地下水流を保全するため、集水・涵養井設置個所に特殊SMW芯材を建て込み、土留め壁を施工。その芯材には通水管をつなぐ治具と洗浄用パイプそして背面側に固化土を取り除く特殊装置が取り付けられている。固化土を取り除き砂や礫を充填し集水・涵養井とする。	準3次元FEM定常解析を行い、水位上昇3m（影響範囲400m）、低下5m（影響範囲850m）と予測。 工事中1mの水位上昇あったが、工事後元に復水。

4.3 メンテナンス

通水施設のメンテナンスは、現場条件を考慮したうえで設計段階に検討する必要がある。通水のための集水あるいは涵養施設には、縦型（井戸形式のもの）と横型（水平ボーリング形式のもの）があるが両方式とも類似した目詰まり特性を有している。以下では、実績の多い井戸形式を中心に記述する。

4.3.1 メンテナンスの考え方

（1）目指すべき方向

従来の強制的な揚水あるいは注水を目的とする井戸と、地下水流動保全工法で用いられる井戸とは、使用目的が根本的に異なる。従来の井戸は、いかにして大量の水を揚水あるいは注水するかが目的である。そのため、大きな負荷をかけることが多く、負荷に伴う目詰まり対策としてメンテナンスが積極的に実施される。一方、地下水流動保全工法での井戸（集水・涵養施設）の目的は、現状の地下水流況を確保することであり、大きな水位の変動や流量変化は許されず、できるだけ現況に近い状態での通水が求められる。そのため、地下水流動保全工法で用いられる井戸に対する負荷は、従来の井戸に比べて非常に小さく、メンテナンスの必要性は少ない。また、このような通水施設は、通常、道路下に建設されるため適用可能なメンテナンス方法も限定され、メンテナンスが実施しにくい状況下にある場合が多い。

したがって、地下水流動保全工法で用いる通水施設は、基本的にはメンテナンスフリーを目標に設計する。ただし、避けることのできない長期的な目詰まりへの対応としてメンテナンス方法の検討を行っておく必要がある。

（2）通水施設の性能とメンテナンスの関係

通水施設の性能を、供用過程に着目し大きく2つに分けて考える。通水施設の供用後、比較的短い期間における集水・涵養施設の性能を初期性能とし、その後の長期にわたる性能を長期性能とする。初期性能には、集水・涵養施設施工時の掘削方法や洗浄方法および仕上げ状況を要因とする井戸損失と、使用段階の比較的初期に生じる目詰まりが含まれる。長期性能は、水質、水温、圧力などの変化に伴う地下水中物質の化学的な変化や微生物の発生などを原因とする進行性の目詰まりに支配される。

一般的に、集水・涵養施設の初期性能は地盤調査結果から計算される井戸能力よりも小さい。長期性能は初期性能を最大値に、以後徐々に低下していく。したがって、メンテナンスフリーという考え方からは、設計に用いる集水・涵養施設の能力（初期性能）は供用期間中に予測される長期性能が必要性能よりも高くなるように設定する必要がある。長期性能の低下が予測以上に激しい場合には、適切な時期にメンテナンスを実施して性能の回復を図る必要がある。これらの関係を模式的に図4.3.1に示す。

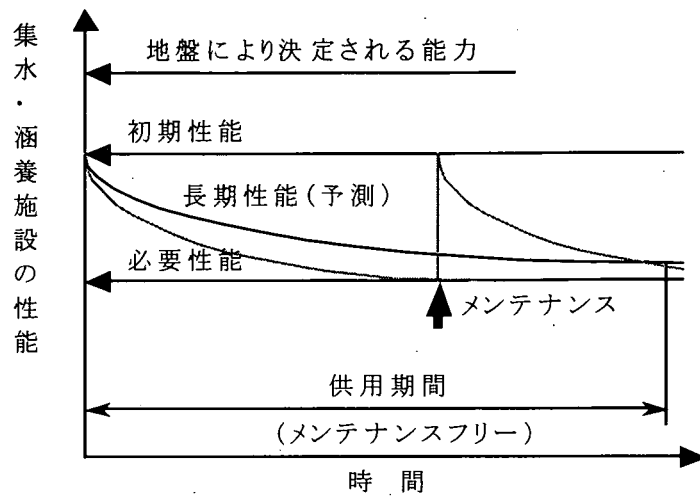


図 4.3.1 集水・涵養施設の性能とメンテナンスの関係

長期間にわたって機能を損なわずに供用可能とするためには、出来るだけ初期性能を高くする必要がある。しかし、いかに目詰まり防止の対策を施し、初期性能を高く確保しても、目詰まり現象を皆無にすることは不可能である。初期性能の設定には、現場状況（地下水質、地下水環境の変化程度等）および他の実施例などの十分な調査が必要である（2.4.9（2）参照）。

4.3.2 通水施設の目詰まり要因とその対策

(1) 目詰まり要因

地下水涵養としての復水工法（リチャージ）における目詰まりの主要因には、①注入水中の懸濁物、②帯水層内での化学反応、③井戸または帯水層での微生物の増加、④注入水中の空気、⑤帯水層に水を注入するときに起こる土粒子の再配列などが挙げられている。

地下水流動保全工法は、基本的には自然流下方式により地下水を通水するため、①と④の問題は生じにくい。②と③については、1本の集水・涵養施設で複数の帯水層を対象に通水を行う場合に生じる可能性がある。⑤は涵養時の流速に依存するもので、流速が過大となる場合には土粒子の移動により目詰まりが発生する。

上記要因を初期性能に関係する目詰まりと長期性能に関係する目詰まりとに分けると、⑤の土粒子の再配列に関する要因は初期目詰まりに属し、②と③の化学反応や微生物の増加に関する要因は長期目詰まりに属する。初期目詰まり要因としての土粒子の再配列に関しては、設計時に適切な集水流速、涵養流速を設定することにより発生を防止する。以下に、長期目詰まり要因としての化学反応や微生物の増加に関して概説する。

1) 地下水中の水溶性物質

目詰まり原因となる地下水中の水溶性物質としては、鉄、マンガン、カルシウム、マグネシウムなどが挙げられる。

通常、地下水は還元条件にあるため、鉄、マンガン等はイオンとして存在するが、酸素と接触すると酸化されて難溶解性の酸化化合物となり目詰まりの原因となる。

また、カルシウム、マグネシウム、鉄等は、溶解性の重炭酸塩の形で地下水中に存在していたものが、圧力の低下や水温の上昇により二酸化炭素が放出されると、難溶解性の炭酸塩に変化する傾向がある。この炭酸塩がスケールとなり、スクリーンやその周辺に付着して目詰まりを発生させる。

2) 地下水中の非水溶性物質

目詰まり原因となる地下水中の非水溶性物質は、大別して藻類や微生物等の有機物と酸化鉄、二酸化マンガン、微細土粒子等の無機物がある。

有機性の懸濁物質がストレーナー内に滞留されると、それを栄養源として微生物の増殖が始まる。微生物からの粘着質の分泌物によって懸濁物がより補足されやすくなる。微生物はそのほとんどが水分であり、間隙を体積的に占める割合が高くなり、顕著な目詰まりが発生する。

(2) 実施可能なメンテナンス方法

長期的に性能が低下した場合には、性能回復を図るためにメンテナンスを実施する必要がある。実施可能なメンテナンス方法を、地上からのメンテナンスが可能な場合と不可能な場合とに分けて示す。

1) 地上からのメンテナンスが可能な場合

土留め壁と分離した構造の集水・涵養施設（井戸形式のもの）では、施設上部からの洗浄が可能なため、通常の井戸と同様の方法で洗浄することができる。自然流下方式による集水および涵養施設での目詰まり要因には、主として①土粒子の移動による再配列、②帯水層内での化学反応および微生物の増加が考えられる。①に対しては揚水ポンプでの排水

による逆洗浄法が、また、②に対しては化学反応物質を用いての除去が有効である。

2) 地上からのメンテナンスが不可能な場合

土留め壁と一体構造とした集水・涵養施設や水平ボーリングなどでは、地上からの洗浄が不可能なため、図 4.3.2 に示す連結管を利用した排水による逆洗浄法や、図 4.3.3 に示す泥膜破壊用配管を利用したバブリングによる方法が提案されている。

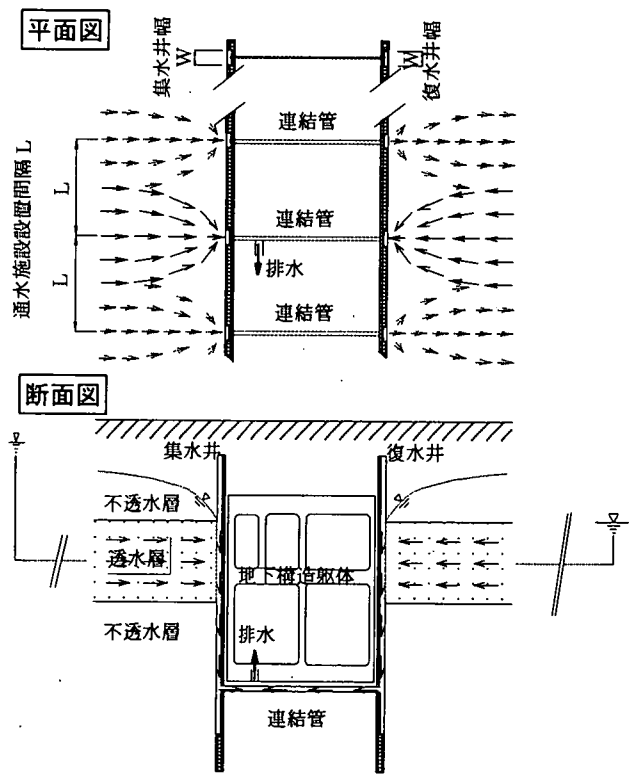


図 4.3.2 連結管を利用したメンテナンス方法

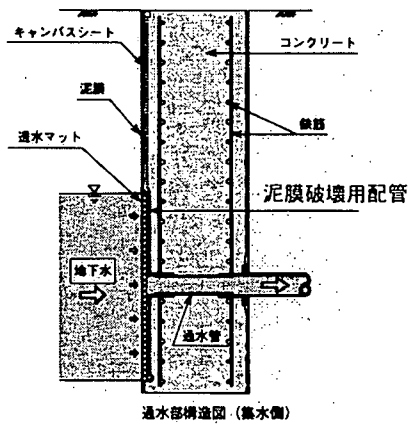


図 4.3.3 バブリングによるメンテナンス方法

4.3.3 通水施設の試験・計測・管理

(1) 初期性能の確認試験

設置が完了した通水施設は設計で定めた初期能力（集水能力、通水能力、涵養能力）が確保されていることを確認する。

■集水装置・涵養装置の能力試験

集水・涵養装置の能力確認方法としては井戸の段階揚水試験と同様に、集水・涵養装置内の水位を段階的に変化（低下あるいは上昇）させてこのときの流量（揚水量あるいは注水量）を計測する段階能力試験を実施する。段階能力試験の方法として、水位を段階的に低下させる段階揚水試験と水位を段階的に上昇させる段階注水試験がある。

段階揚水試験では集水・涵養装置に設置したポンプを稼働して揚水する方法と、集水・涵養装置に連結した通水管から自然排水させる方法が考えられる。いずれの場合もバルブなどを用いて流量を調整する。段階注水試験では集水・涵養装置に水を注入するが、注水する水をどのように確保するか、またこの水により目詰まりが生じないかなどの配慮が必要である。いずれの試験においても過大な負荷を与えることは土粒子移動による目詰まりの原因となるため、想定される水位変動の 2 倍程度の範囲で試験を実施することが望ましい。

試験結果は水位変動量 (s) と流量 (Q) の関係を s - Q プロットとして普通軸上で整理し、両者がほぼ比例関係にあることを確認する。この直線の勾配 s/Q （あるいはこの逆数 Q/s ）を集水・涵養装置の初期能力として評価し、この値が設計で定めた初期能力を満足していることを確認する。

設計で定めた初期能力が満足されていない場合、集水・涵養装置の洗浄を行って能力の向上を図る。洗浄作業後に再度、同様の能力確認試験を実施し、所定の能力が確保できない場合などは集水・涵養装置の増設を検討する。

■通水部を含む能力試験

通水部を含むすべてのシステムでの能力試験を行う。集水装置～通水管～涵養装置を接続した後、集水・涵養装置内の水位を計測し、両者に大きな水位差が生じていないこと（通水部に過大な損失がないこと）を確認する。両者の水位差が大きい場合には通水管のスケールアップなどを検討する。

同時に、集水装置～涵養装置間の流量を計測する。地下水の上流側～下流側の間に大きな水位差がない場合などには、計測可能な流量が認められないことが想定される。このような場合には、試験的に集水・涵養装置の片方から揚水（あるいは注水）してもう一方の装置の水位を計測するとともに、流量測定を行うなどの試験を実施する。

(2) 通水状況の計測と管理

通水を長期間継続すると、目詰まりの進行により通水施設の能力が低下することが考えられる。地下水流動保全という観点から所定の機能が得られていることを確認するための計測と、この結果を反映した管理が必要である。

■地下水流動保全工法における計測管理の位置づけ

地下水流動保全工法の適用目的は、構造物建設による地下水位の変動を許容値（3.4 参照）以内におさめることにあり、この効果が確実に得られていることを確認する必要がある。地下水流動保全工法については地盤調査の不確定要素、解析・設計法の不確定要素、さらに工法自体の不確定要素など種々の要因が考えられ、想定どおりの効果が得られない可能性も高い。また、目詰まりによる能力低下も避けられない問題であり、この進行速度も現場条件により様々である。

このような意味で計測管理は工法の妥当性、有効性を確認するための唯一の方法である。また、影響評価の段階で対策不要と判断された場合においても、調査結果、影響評価結果の妥当性を検証するための計測は不可欠である。装置自体および周辺地盤内における長期的な水位、流量の計測は地下水流動保全工法の一部として必須の要素といえる。

■通水状況・周辺環境影響の計測

通水の継続により目詰まりが進行すると、集水・涵養装置および通水部でのロスが大きくなりシステムとしての能力が低下する。具体的には通水流量の減少とこれに伴う上流側地下水位の上昇、下流側地下水位の低下という現象が発生する。

計測計画で検討すべき事項を以下に列挙する。

- ・ 計測目的：通水機能の低下状況を把握すると同時に、どの部分（どの装置）での機能低下が著しいかを明確にしてメンテナンスを効率的に行うための情報を得る。
- ・ 計測項目：上流側地盤内地下水位、下流側地盤内地下水位、集水装置内水位、涵養装置内水位、通水流量、さらに必要に応じて水質の計測なども行う。
- ・ 計測箇所数：地盤の均質性、通水施設の信頼度（装置ごとの性能のばらつき）、周辺構造物の重要度など現場状況により定める。
- ・ 計測方法：手動計測あるいは自動計測による。管理値として重要な項目（地盤内水位など）は自動計測とすることが望ましい。
- ・ 計測頻度：手動計測の項目は1回/月、自動計測の項目は1回/日程度とする。

なお、地下水環境への影響を左右する降雨、周囲での地下水位低下工法を用いた工事の有無などは重要なファクターである。計測結果のみを盲信するのではなく、環境条件についても十分な追跡調査を行う必要がある。

■計測結果に基づく管理

通水設備の能力低下により発生する地下水位などの変動が設計時に定めた許容変動量を超えないよう管理する。上流側地盤内地下水位および下流側地盤内地下水位が許容値内に

あることを最終管理項目とする。また、機能低下の進行状況が把握できるよう水位および流量を経時変化グラフとして表示し管理する。

各項目について以下の二段階の管理基準値を定めることが望ましい。

- ・ 第一段階管理基準：メンテナンスの実施を奨励する基準値
- ・ 第二段階管理基準：メンテナンスの実施を強制する基準値

(3) 事後対策

計測管理により以下のような地下水流動保全工法の性能不足が認められた場合、事後対策としての工法を追加する必要がある。

- ・ 事前検討により地下水流動保全工法の必要性は認められなかったが、構造物建設後に予想以上の水位変動が生じた場合
- ・ 通水施設の初期性能が不十分であり、所定の水位、流量を満足できない場合
- ・ 通水施設が目詰まりにより能力低下を起こし能力不足となったが、施設の能力回復手段（メンテナンス手法）がない場合
- ・ 通水施設が目詰まりにより能力低下を起こし能力不足となったとき、メンテナンスを実施したが十分な能力回復ができなかった場合、あるいは頻繁なメンテナンスが必要となった場合

事後対策として適用できる工法は、施工条件、作業場所、用地の問題から限定されたものになる。特に、構造物供用開始後には事後対策として追加できる工法は非常に限られたものになる。このような観点から、できるだけ早期より地下水流動保全工法の機能確認を行うことが望ましい。適用可能な工法として以下のようなものが考えられる。基本的には現在までに、構造物建設後に予期せぬ地下水流動阻害の問題が発生し、その対策として適用された工法である。

- ・ 水平水抜きパイプの設置：構造物および土留め壁を削孔して水平方向あるいは斜め方向の水抜きパイプを設置する
- ・ 土留め壁の破壊、引き抜き：帯水層深度に相当する部分の土留め壁を破壊したり、引き抜いたりすることにより透水性を確保する
- ・ 壁外へ集水・涵養井戸を設置：用地的に余裕がある場合は、土留め壁外側に集水井戸、涵養井戸を設置し、これを連通させて通水させる

通水施設の能力不足を事後対策により補う場合、施設設置後、直ちにこれを稼働（通水）して、効果を確認しながら増設を検討する。十分な機能が期待できない施設をやみくもに設置してその効果が得られないというような結果とならないような配慮が必要である。

4.3.4 計測事例

前節で述べたように、初期能力を確認した上で長期的な通水能力を確認するための計測管理は必須である。ここでは、通水施設を設置した後に地下水位等の計測管理を継続して行っている2つの事例を紹介する。

(1) 三宮地下鉄工事 (4.2, No.6 の施工事例)

①計測管理上の特色

当工事では当初より対策工を実施しているのではなく、ダムアップの兆候が見られた後に、応急処置、恒久処置の順で対策工を実施した。ダムアップ現象は、局所的な地層構成（水みち等）に少なからず影響を受ける性格のものであるため、遮水壁施工時には水位観測孔のみを周辺に設置しておき、十分な計測管理のもとに必要最低限の対策を事後に講じるという手法は、コスト面から判断するとコンセンサスを得やすい。

このような観点から、当工事では通水対策を行う時期やグレードの選定にあたって、計測管理をいかに効率的に行うかが重要なポイントとなった。

②調査項目

事前計測は、季節変動を考慮して連続壁施工の約1年半前より開始した。上流側地下水位上昇による近接ビルの漏水や浮力による安定上の問題が懸念されたため、ビルの床面レベルと地下水位との関係、および地下室への漏水量を管理した。また、下流側地下水位低下によって周辺井戸が枯渇することが懸念されたので、井戸内水位を観測項目とした。

図4.3.4に通水管と水位観測孔の配置を平面図として示す。

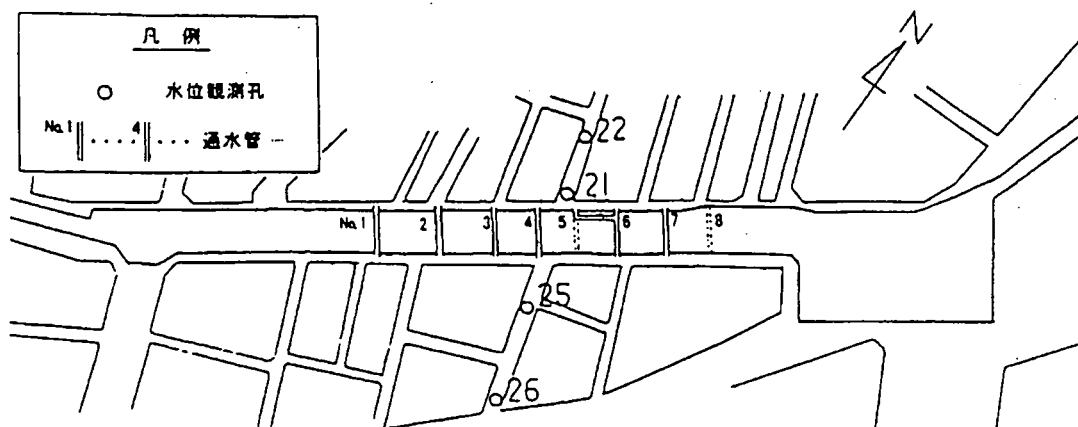
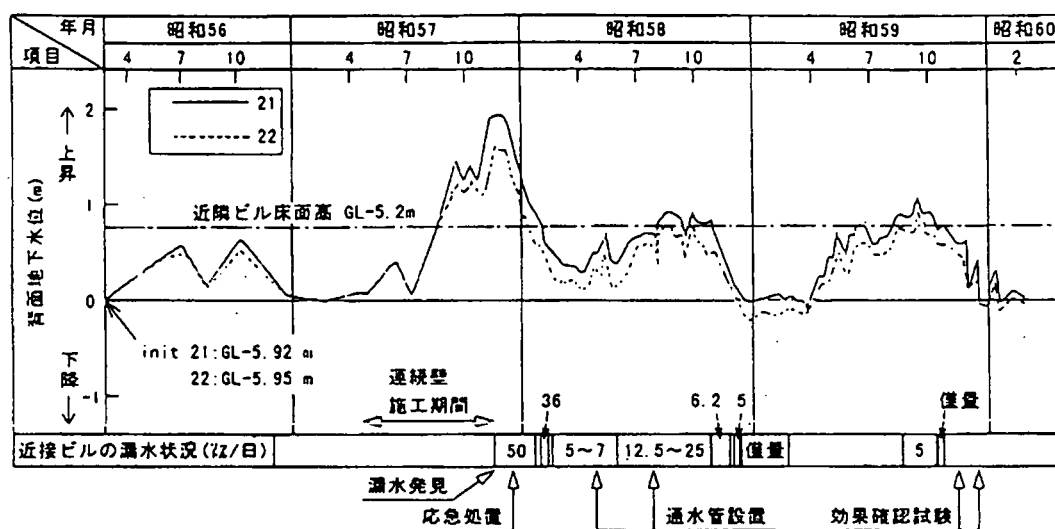


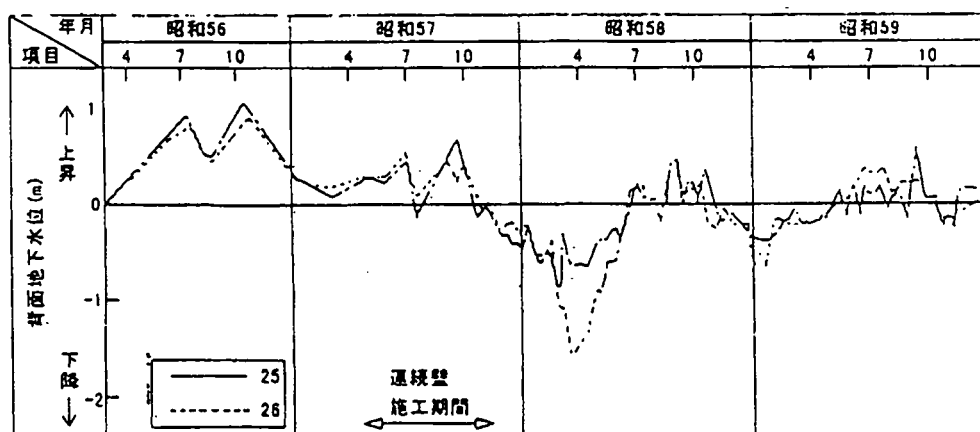
図 4.3.4 通水管と水位観測孔の平面位置図

③計測事例

図 4.3.5 に地下水位の経時変化を示す（図中グラフ凡例番号は、図 4.3.4 中の観測孔番号）。遮水壁施工中は、施工手順の影響から上流側の水位上昇と下流側の水位低下は若干のタイムラグがみられる。この事例の場合、上流側水位上昇のピークの約 4 ヶ月後に下流側水位低下のピークが現れていることなどを考えると、遮水壁施工途中の動向をフィードバック解析すれば、締め切り完了後の状態を早期に予測できるものと考えられる。



(a) 北側(上流側)



(b) 南側(下流側)

図 4.3.5 地下水位変動量の経時変化

次に、通水管別の通水流量を図 4.3.6 に示す。

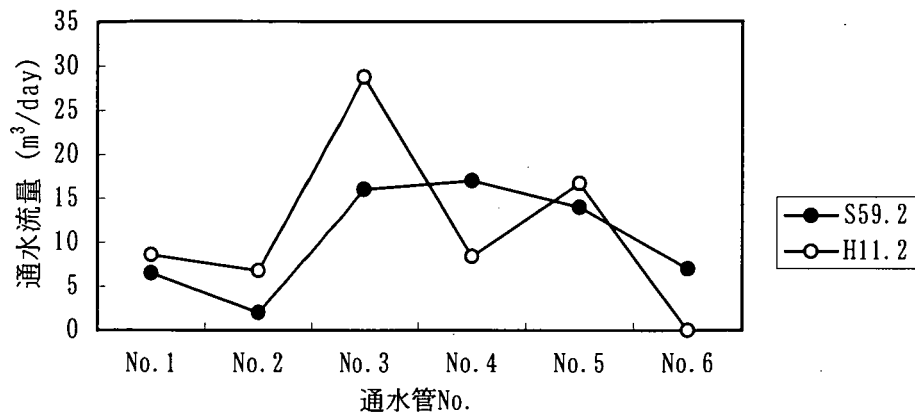


図 4.3.6 通水管別通水流量

昭和 59 年の日当たり平均通水流量が 6 本の通水管で $71\text{m}^3/\text{day}$ なのに対し、平成 11 年では $69.1\text{m}^3/\text{day}$ であり、大きな変化は見られない。個々にみると、平成 11 年で No.4 通水管の機能が低下している反面、この両側の通水管の通水流量が増えている。このことから、1 本が目詰まりにより能力低下すると、その両側へと水みちが変化する傾向がよみとれる。

また、ここでは土留め上下流の水位を観測し、影響のない範囲で地下水を中水として構内清掃等に使用しながら水位変動を調整している。図 4.3.7 は平成 9 年および 10 年における月別の中水使用量を示したものである。

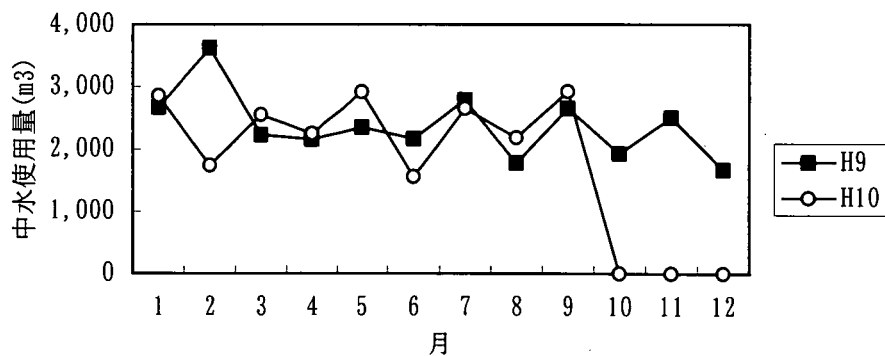


図 4.3.7 月別中水使用量

当事例では、恒久的な通水管を設置して依頼、近接ビル等から漏水の苦情もないため、メンテナンスや追跡調査は行っていない。また、H12 年度現在、近隣で地下鉄海岸線の工事が行われているため、定常的な地下水状態には至っていない。

(2) 環 8・井荻立体化事業 (4.2, No.2 の施工事例)

①計測管理上の特色

当工事は、昭和 63 年度から平成 9 年度までの長期にわたる立体交差事業であり、かねてから地下水流の阻害について懸念されてきた。工事の進捗にともなって以下の 3 種類の対策工を行っている。

- ・躯体底板中への通水管設置 (第一期 (平成 5 年度)、第二期工事 (平成 6 年度))
- ・躯体上床版上部からの斜め通水管設置 (平成 7、8 年度)
- ・柱列式ソイル壁の切除去 (SMW 切削・砂置換工法、平成 8 年度)

ここに示す事例は、計測結果に基づきそれぞれの対策工の効果を評価したものである。

②調査項目

事前計測として、連続壁施工の約 1 年半前(S63.10)より観測井戸を用いて地下水位の計測を開始した。事前解析段階では水理地質調査、通水管施工時には設置前後の地下水位の計測と上下流のヘッド差と通水量との関係を確認する通水性能試験を行った。また、SMW 切削工を施工した時には、流向・流速の調査を行った。

③計測事例

図 4.3.8 に観測井の測線と帯水層区分を示す。当該区間では東西方向の地下水流が想定されたため測線も東西方向を基準とし、工事区域外の南北それぞれ約 300m 地点まで測線を配置した。通水対策工の効果は、地下水位分布のコンター図によって判断する。

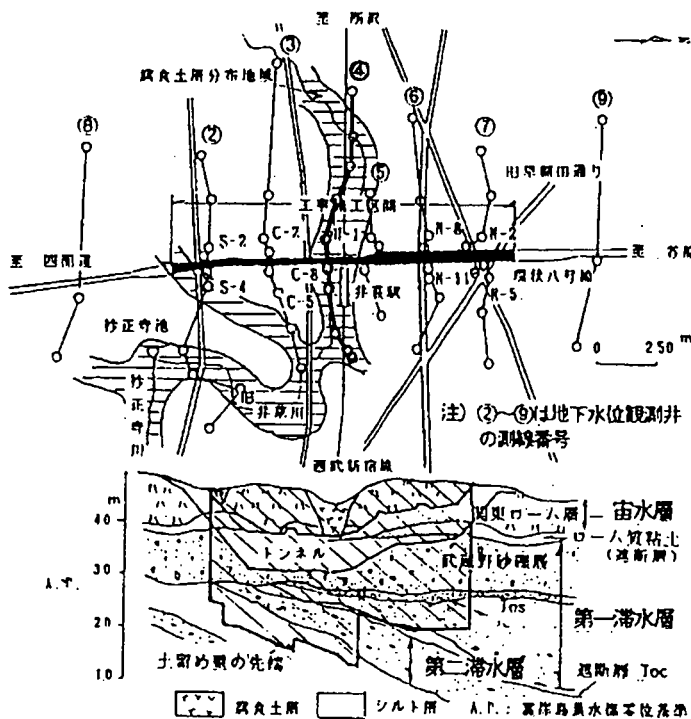


図 4.3.8 観測井の測線と帯水層区分

通水管設置前後の上下流の水位変動(④側線)をグラフにしたものを図 4.3.9 に示す。対策工の効果は、基底水位(渇水期における最低水位)によって評価する。同時に施工されている隣接工区の遮水工事が地下水環境に影響を及ぼしていることも考えられるが、定性的にみると対策工施工後、約 1 ヶ月ほどで通水効果が顕著に表れ 3 ヶ月程度で落ち着く傾向にあるものが多い。

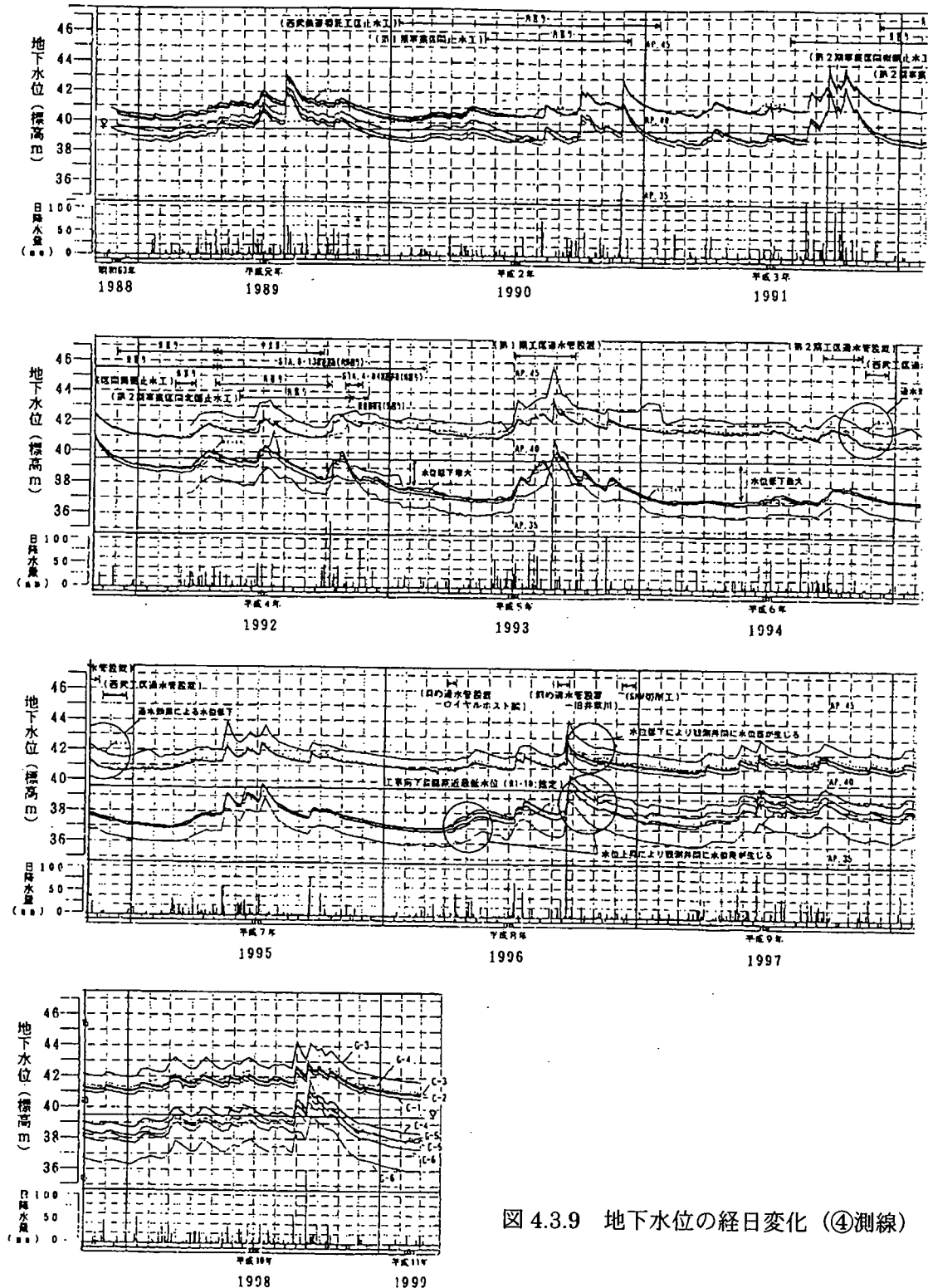


図 4.3.9 地下水位の経日変化 (④測線)

図 4.3.10 は 地下水位分布の変化をコンター図で示したものである。

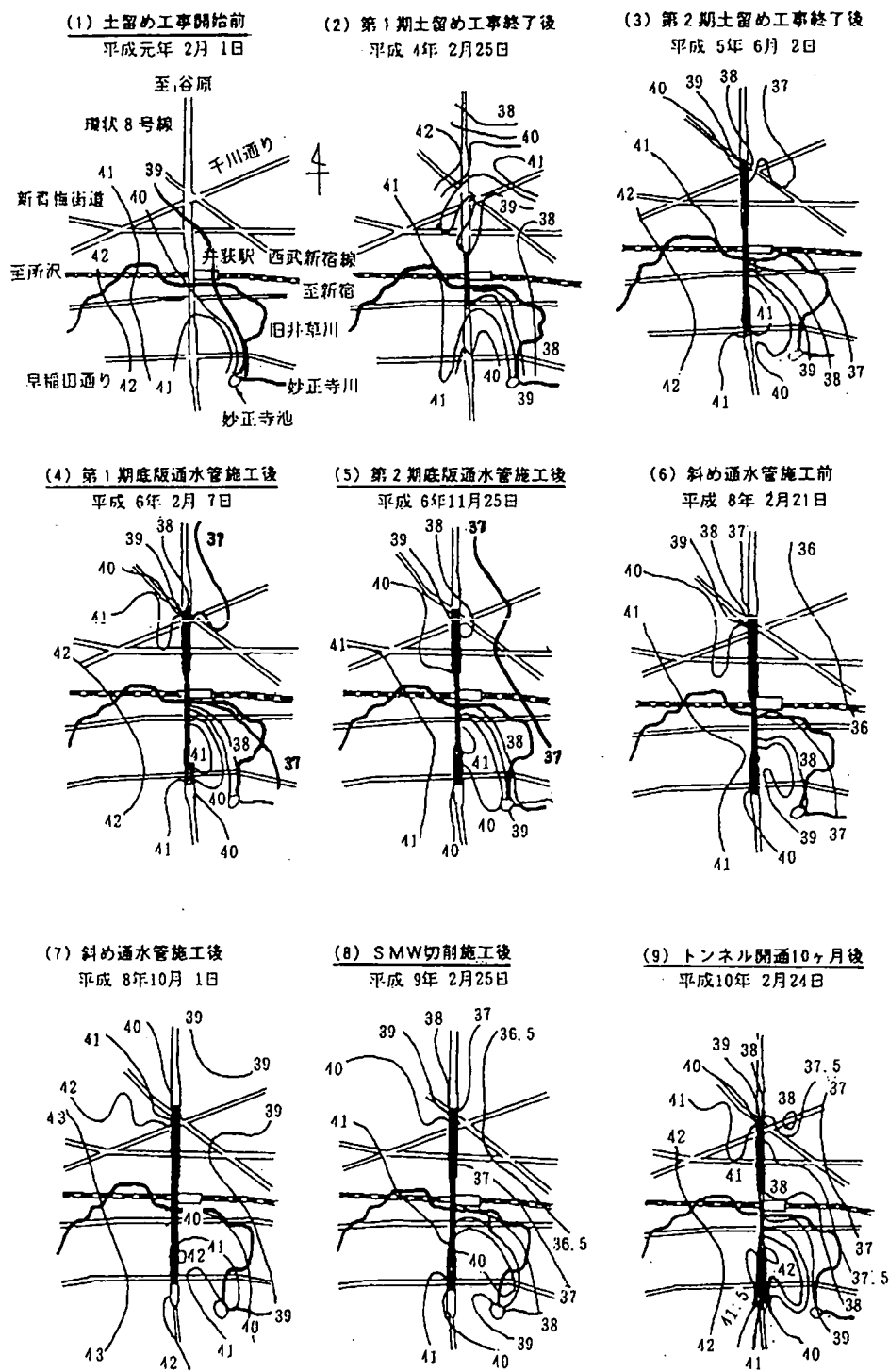


図 4.3.10 地下水位分布の変化

第1期と第2期通水管施工後の地下水位分布図(step(4)とstep(5))の比較から、第二期通水管の効果を読み取ることができる。施工区間を挟んだ西側で地下水位が低下しており、東側では、第1期通水管施工後のT.P.+37mの形状が北と南が繋がっていなかったが(step(4))、第2期通水管施工後(step(5))は連続した等高線となり、土留め工事開始前の等高線T.P.+39mの形状(step(1))に近似している。また、斜め通水管設置後の渇水期(冬期 step8 以降)は、西側で水位低下、東側で水位上昇の傾向が現れており、その効果が認められた。

通水施設の機能低下の要因として、ストレーナー管の開孔率の減少(目詰まりの進行など)や、ストレーナー管周りの地盤中に土の細粒分が集まり透水係数が低下することなどが挙げられる。これらを防ぐには、集水・涵養管周りの動水勾配を小さくし、地盤内の細粒分の移動を抑えることが大切であるが、集水管周りの状況を現地で把握することは困難である。通水管の機能を検証するために、観測井において水位を計測管理してその変動を把握することが不可欠である。

図4.3.11に対策工の機能変化について示した。1999年(平成11年)2月の水位は1994年(平成6年)5月の水位より、工事区間の東側区域において、斜め通水管を設置した④測線付近を中心とした北東区域の約500mの範囲で、1.4～0.2mの水位上昇が確認される。通水管設置直後(1997年:平成9年)の渇水期地下水位変動量の上昇量0.2～0.4mの等高線と比較すると、東側に上昇範囲が拡大し、北側で通水効果が小さい領域が認められるものの、その差は小さい。このことから、通水施設の機能は、この2年間で減退することなく維持されているものと判断できる。

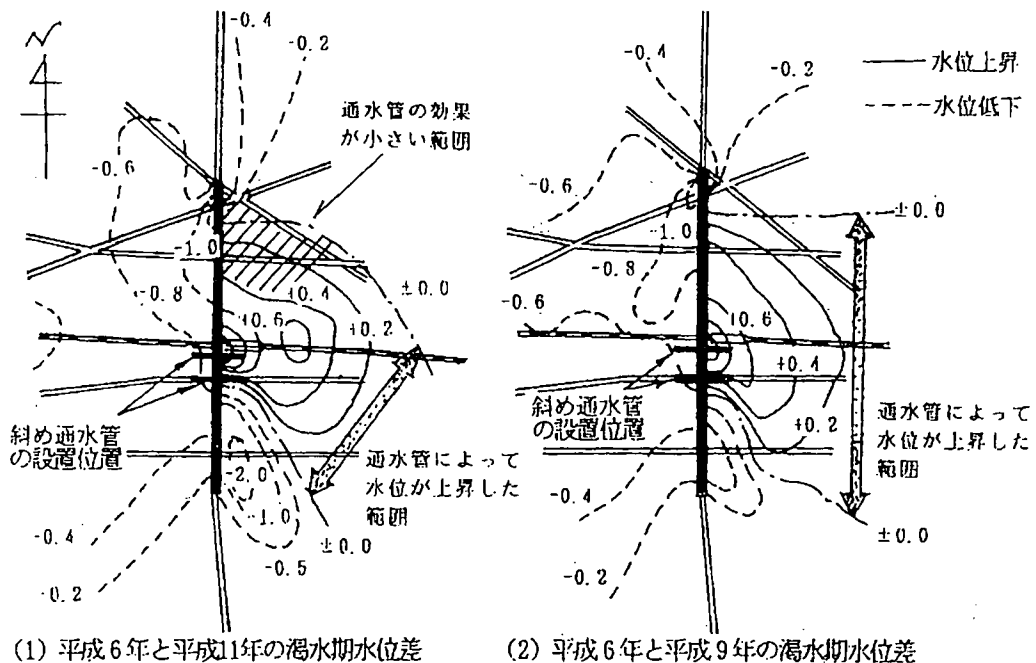


図 4.3.11 対策工の能力変化

この施工事例では躯体構築の段階で地下水流動保全のための対策工を施工していくことになったが、地下水の実態把握が技術的に難しく、試行錯誤で施工実績を積み重ねている。したがって、地下水流動保全を有効に行うためには、ある基準にのっとりた予測解析を行った後に十分な計測管理を行い、この結果をフィードバックしながら具体的な対策を講じるといった手法が重要と考える。

おわりに

地下に長大構造物や線状構造物を建設する場合、建設工事や出来上がった構造物によって、地下水の自然の流れが阻害され、地下水の流れが変化する可能性があることは周知の事実である。

地下水流は、河川と同様に地下の河川での流れであり、構造物で遮断するということは、河川にダムを作ることに似ている。上流側はダムアップし、下流側では水位低下が生じることになる。

従って、地下構造物を建設する場合には、自然環境保護の面から考えて、出来る限り地下水流動阻害が生じないような線形計画、地下建造物の設計ならびに施工計画とすることが環境アセスメントとして、初期の工事計画段階において必要となる。

しかしながら、種々の条件によってやむなく計画した地下建設工事によって、地下水流動阻害が起きうる場合もある。この場合には、むやみに流動阻害を見過ごすのではなく、地下水流動保全の対策を講じることによって、極力、地下水の流れを自然の状態に保つことが重要である。

そこで現在までに、建設技術および環境技術の粋を集めて、開発されてきた種々の地下水流動保全対策が提案されてきた。これらの各々の対策を一つの工法として位置付け、必要とされる現場に広く普及して頂くため、調査、設計から施工、メンテナンスにわたるマニュアル（試案）を作成するに至ったものである。

ここでは現状技術のもとでの地下水流動保全工法を対象としているが、技術の発達とともに新たな地下建設工法や流動保全工法が開発されるものと考えられる。これらの技術の発展に伴い、当然それに応じた流動保全工法のマニュアル化の見なおしが必要となる。また、ここで提案した地下水流動保全工法の調査、設計、施工、メンテナンスについても、現場毎の条件に応じた検討が行われるべきである。

従って、このマニュアル（試案）は、地下水流動保全を検討するための、当面の手引き書として利用して頂き、適用性を再度評価、分析することによって、より実務的な内容に改善されていくものと思われます。

*マニュアル（試案）に関するご意見、ご質問等がございましたら、
下記メールアドレスまたは FAX にてお問い合わせ下さい。

E-mail: gwhozen@geor.or.jp

Fax: 06-6578-6256

(地下水流動保全工法に関する研究委員会宛)

卷末資料

地下水流動保全工法の現状

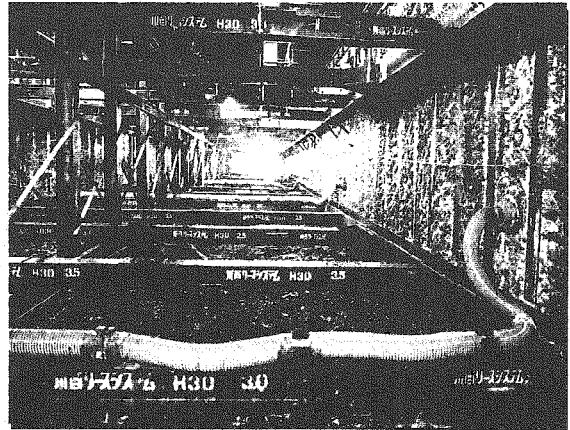
施工法	施工会社
① S.N.F.工法	S N F 協会
② クボタ覆水工法	株式会社クボタ
③ 両面型内井戸による地下水流動保全工法	清水建設株式会社
④ 通水S M W工法	八千代エンジニアリング株式会社 株式会社銭高組
⑤ 通水R C連壁工法（E D W）	八千代エンジニアリング株式会社 株式会社銭高組
⑥ バイオ通水連壁工法	大成建設株式会社

S.N.F.工法

【概要】

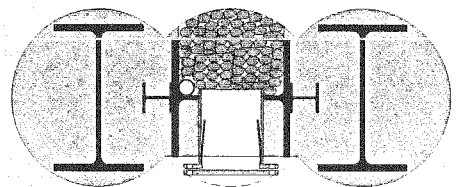
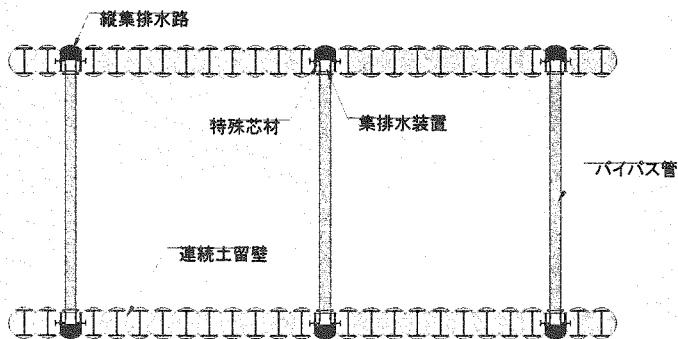
地下鉄工事、共同溝、大規模な建設工事などによる地下水脈の分断によって起こる被害が大きな問題になっています。そして、地下水脈の復元工事に対して、今まで課題であった工事期間、経済性、技術面それぞれを解決する画期的な工法として、S.N.F.工法が開発されました。

S.N.F.工法は、柱列止水土留壁などを施工時に有効利用して集排水機能付き土留壁を造成することで、地下水を分断することなく自然流下により通水することで、施工完了後はもとより施工中も地下水流の永続的な流動を可能にする工法です。



SMW 壁とバイパス管

【通水システム】



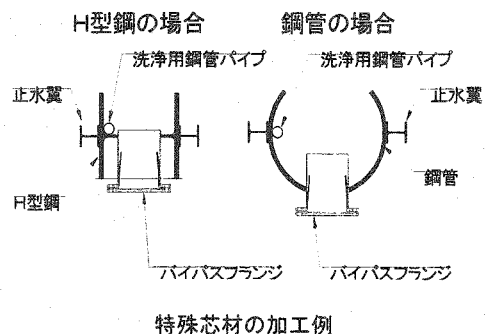
↑ 上図：バイパスフランジ取付部分 SMW 壁の拡大平面図

← 左図：通水システムの平面配置図 (例)

S.N.F.工法の通水システムは、土留壁背面の縦集排水路、バイパスフランジを取り付けた特殊芯材と土留壁間を結ぶバイパス間で構成されます。

《特徴》

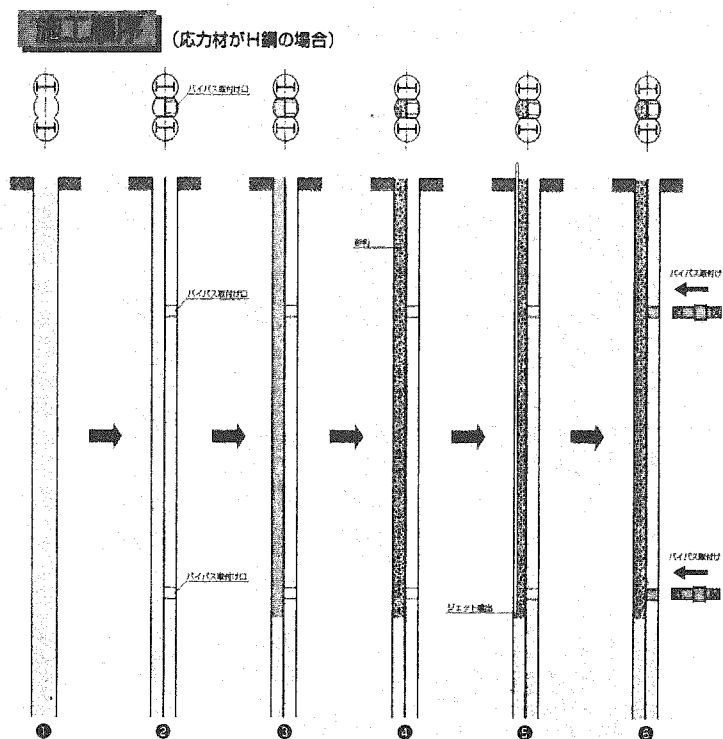
- ① 工事施工中および施工完了後も地下水を遮断することがなく、自然の地下水環境を保全できる。
- ② 柱列壁応力材がH型鋼、鋼矢板、鋼管のいずれにも適用が可能である。
- ③ ソイル押し出し装置は転用が可能であり、施工も特別な機械を必要としない。
- ④ 従来行われているアースオーガ等によるソイル壁の破碎の必要がなく、工期・工費ともに有利である。



特殊芯材の加工例

【 施工順序 】

- ① ソイル地中壁削孔、芯材立てこみ。
- ② 縦集排水路となる箇所にバイパスフランジを取り付けた芯材を立てこむ。
- ③ 背面側のソイルを特殊装置により押し出す。
- ④ 特殊装置を取り出し、砂、砂利などのフィルター材を投入する。
- ⑤ 高圧水流を用いて孔内を洗浄、残留したソイル膜を取り除く。
- ⑥ バイパスフランジにバイパス管を取り付ける。



【 用途 】

山留め壁築造によって地下水が遮断され、地下水環境の変化が懸念される場合に、安い工事費で確実な通水効果をもつ土留壁を構築することが出来る。

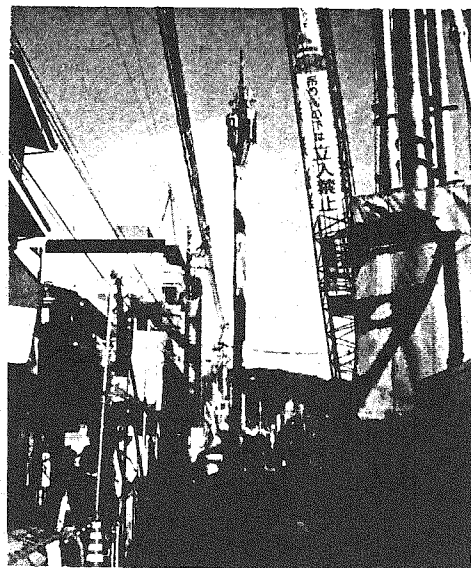
- ・ 柱列地中壁による開削工法全般に適用可能

【 施工実績 】

京都地下鉄烏丸線(北山通工区)84ユニット
(SMW 工法への適用)毎分70ℓ/1ユニット

【 特許 】

特許No. 特開平7-224420



特殊装置建て込み状況

S N F 協 会

事務局 〒639-02 奈良県香芝市西真美3丁目2番地4

TEL. 07457-6-7151

FAX. 07457-6-7174

クボタ復水工法

【 概 要 】

市街地やその周辺部を通過する高規格道路は、景観配慮や住環境維持のため従来の高架から掘割構造とする設計が増加していますが、その土留め壁や地下構造物が地下水流を分断するため、周辺の地盤沈下、井戸枯渇等の地下水障害を引き起こす危険性があります。

そこで図 1に示すように、地下構造物完成後に土留め壁のソイルセメントをスリット状に破碎して通水孔を構築することにより、一旦分断した地下水流を復元させる「クボタ復水工法」を開発いたしました。

この工法は、通水孔の構築位置には鋼管を根入れせずに地下透水層の上端付近まで浅浅くしておくことにより、地下構造物設置位置より深い地下透水層に対しても、経済的かつ確実に通水孔を構築することができる工法です。

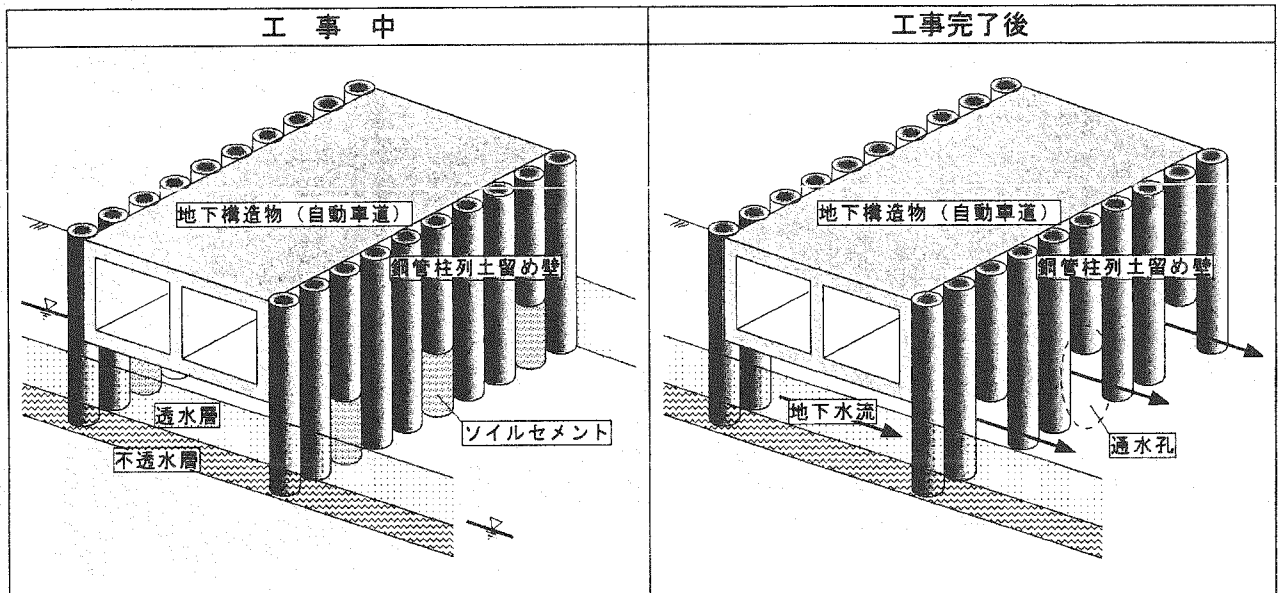


図 1 クボタ復水工法

【 特 長 】

1. 地下構造物設置位置より深い地下透水層の通水が可能です。
2. 通水孔の施工は小型の機械で簡便に行えます。
3. 集水・涵養井戸を用いないため、施工用地を有効に活用できます。
4. 自然流下式のため、ポンプ施設とそのメンテナンスが不要です。

【通水孔の構築方法】

1. 鋼管柱列土留め壁を構築します。
2. ウォータージェット施工機を、通水孔構築位置に設置し、ジェットノズル挿入用のボーリング孔を削孔します。
3. ボーリング孔内で、ウォータージェットを噴射・回転し、通水孔を削孔します（図 2、写真 1-2）。
4. 通水孔の透水性能を現場透水試験等で確認します。

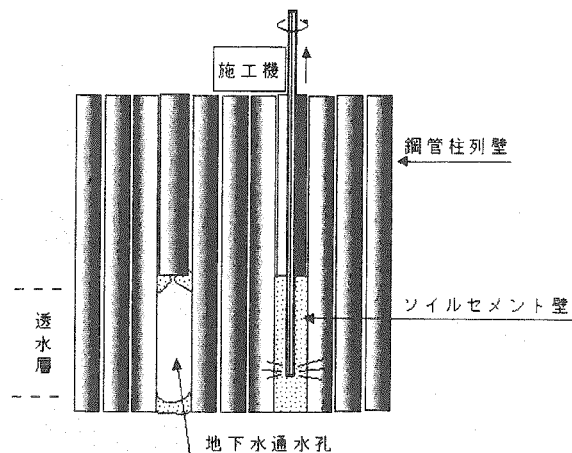


図 2 通水孔構築方法

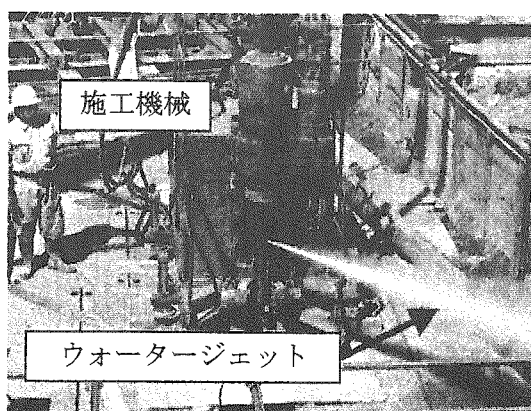


写真 1 ウォータージェット噴射状況

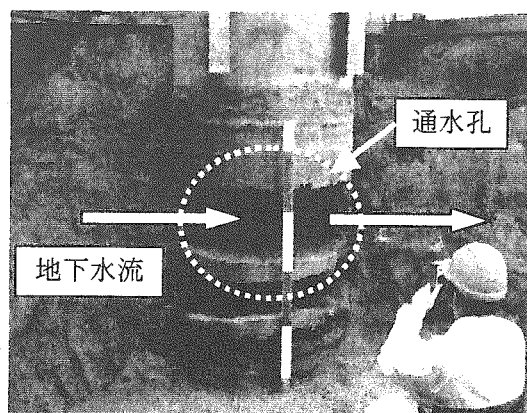


写真 2 構築された通水孔断面

【用途】

土留め壁により地下水が遮断され、地下水障害が心配される土留め工事

【特許】

特願平 9-189002 「鋼管柱列土留壁を用いた地下水脈復元工法」

特願平10-288725 「鋼管柱列土留壁における地下水通水孔の開設方法」 他

【問い合わせ先】

株式会社クボタ 鋼管事業部

東京本社 東京都中央区日本橋室町3-1-3

03(3245)3266

本社 大阪市浪速区敷津東1-2-47

06(6648)2323

両面型壁内井戸による地下水流動保全工法

■ 工法の背景

線状構造物の建設により、地下水の流れが遮断され地下水や地盤の環境に様々な影響を及ぼすことが懸念されます。本工法は建設後においても地下水の流れを保全する環境にやさしい構造物を実現するものです。

長大構造物

- ・高速道路
- ・地下鉄道など

用地問題・環境問題

- ・地下化
- ・大深度化

地下の環境問題

- ・地下水流の遮断
- ・地下水、地盤への影響

工法の開発目的

- ・施工中の地下水処理
- ・施工後の地下水保全

■ 工法と装置の概要

井戸構造の装置を土留め壁（ソイルセメント柱列壁）内に設置し、

- ・ディープウェルの代替工法
- ・地下水流動保全工法

などとして適用するものです。

装置は、

- (1) 土留め壁の削孔内に挿入する2つ割構造のスクリーン
 - (2) 建込後に孔内で拡張するジャッキ
 - (3) 両スクリーン間を連結する通水管
 - (4) 通水管に装備された地上から開閉可能なバルブ
 - (5) 揚水およびジェット洗浄を可能にする洗浄パイプ
- などにより構成されています。

■ 工法の特徴

1 ローコスト化

装置設置のための削孔を土留め壁施工機械にて行うため、安価な施工が可能となります。

2 省スペース化

装置を土留め壁内に設置するため、

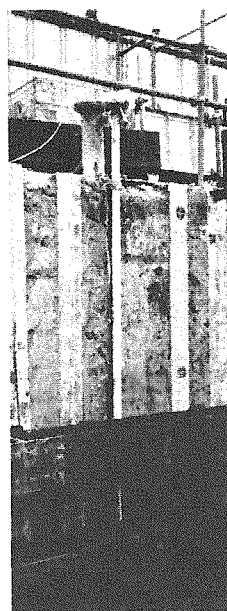
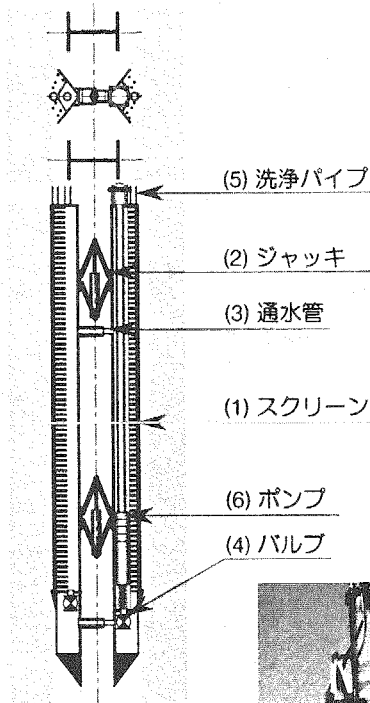
- ・掘削内の作業効率低下を防ぐ
 - ・隣地境界際での地下水流動保全工法が可能
- などのメリットがあります。

3 容易な設置作業

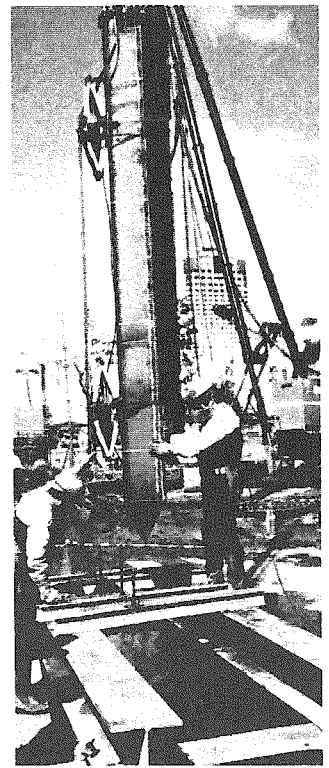
設置は芯材の建込と同様にクレーンを使うことにより容易に行えます。設置後の洗浄作業も高圧洗浄装置とバキュームポンプで短時間で可能です。

4 多様な機能

ポンプ設置が可能なシャフトを配置し、施工期間中の通水運転や、通水継続による目詰まり対策のメンテナンス作業が容易に行える構造となっています。

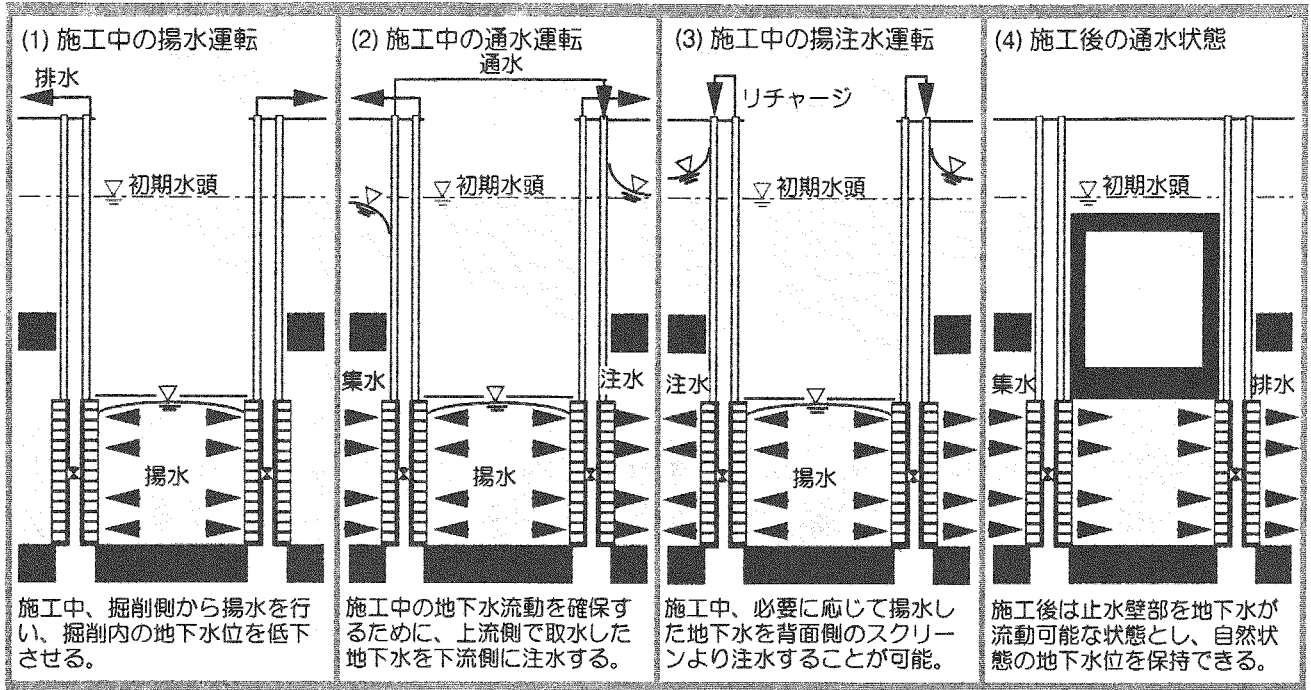


稼働中の壁内井戸

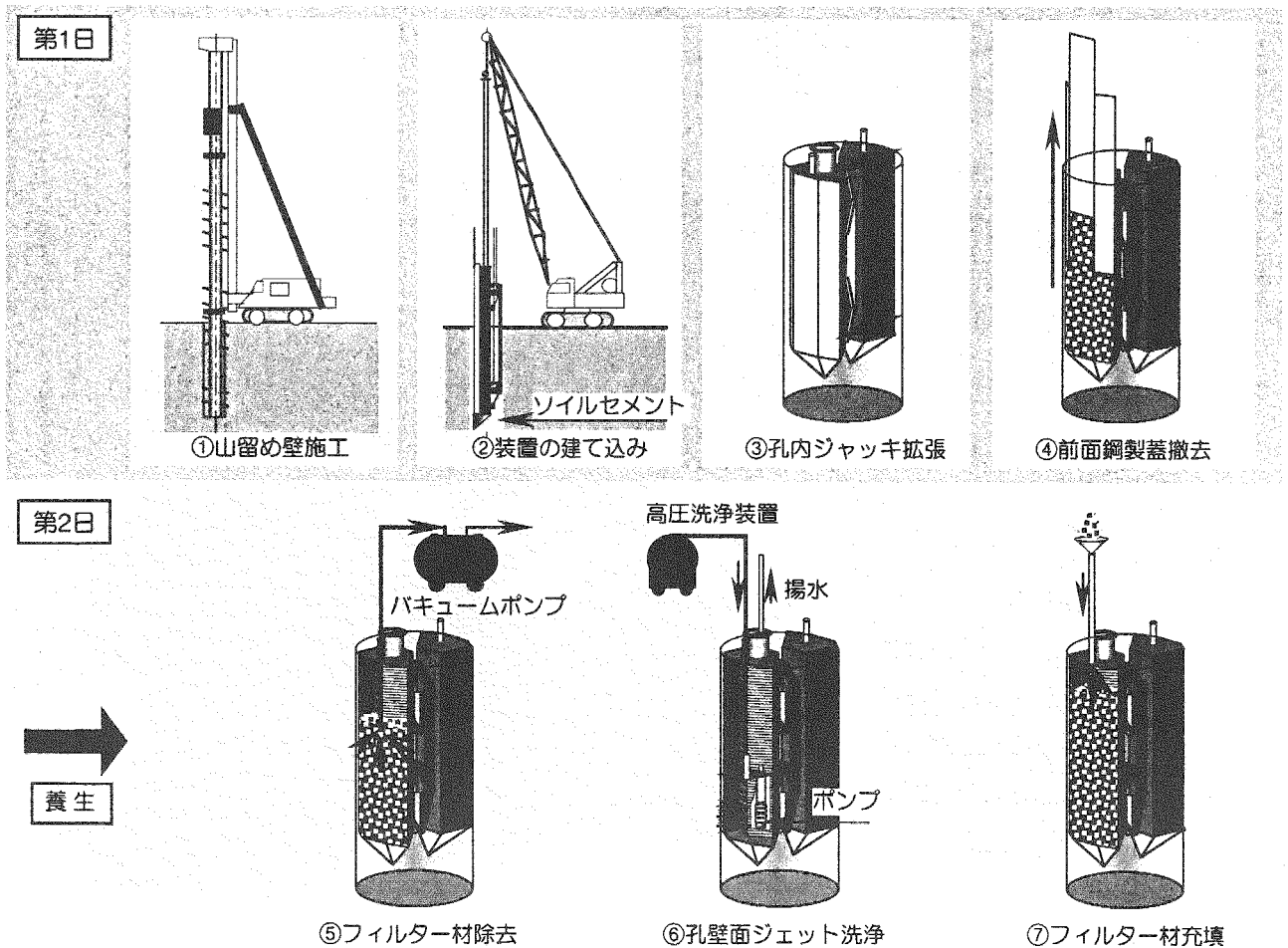


壁内井戸設置状況（片面型）

■ 機能のバリエーション



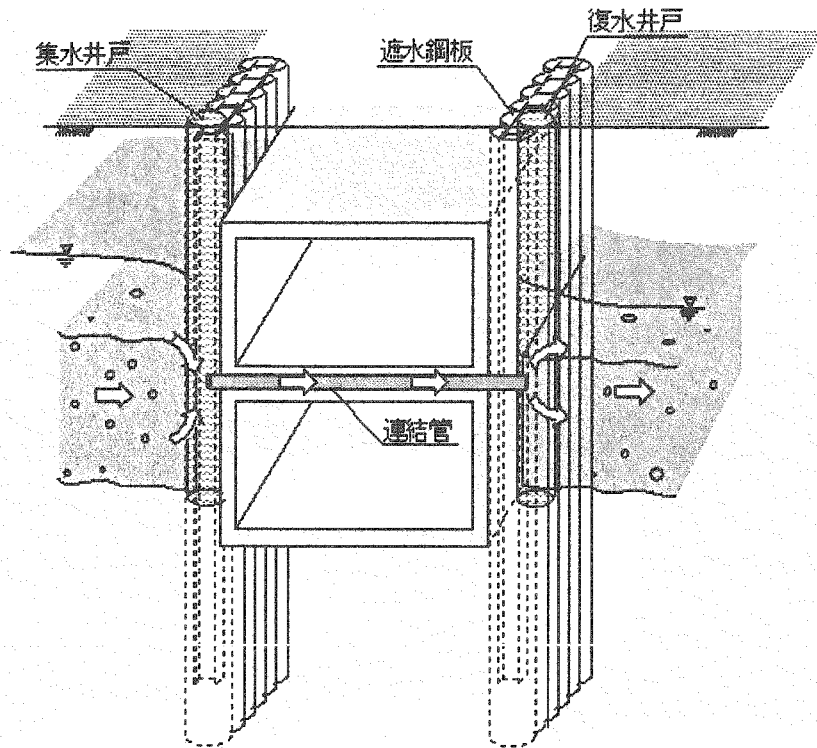
■ 施工手順



環境にやさしい

通水SMW工法

(地下水流動保全)

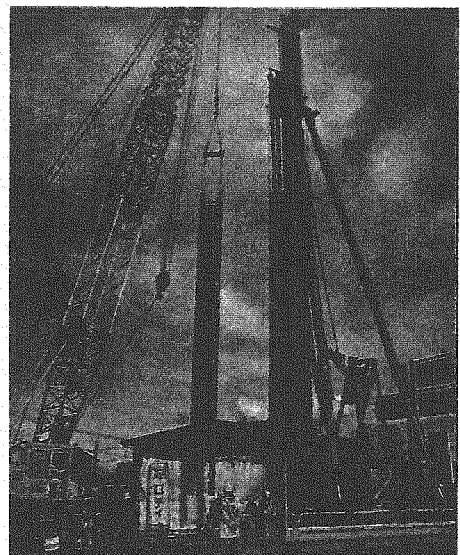


道路や鉄道のように線状の構造物を地下に建設する場合、地下水流の遮断によって井戸枯れや地盤沈下などの被害が懸念されます。本工法はSMW土留め壁を対象に「施工時は遮水、完成後は通水」を可能とした地下水流動保全工法です。

通水SMW工法はSMW壁の背面に集水と復水のための井戸を設置し、連結管により上流側から下流側に流れる地下水を確保することができる工法です。

【特 徴】

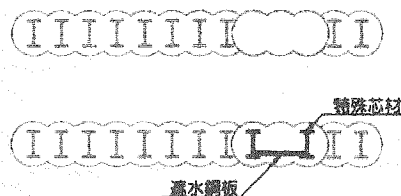
- ① 維持管理が容易
自然流下による迂回方式を採用するため、特別な施設や動力が必要ありません。
- ② 既存用地内での施工が可能
井戸の構造体は大部分が土留め壁内に収まります。
- ③ 長期的に安定した通水が可能
井戸部は芯材間を有効に利用するため、広い通水面積が確保できます。



試験施工の状況写真

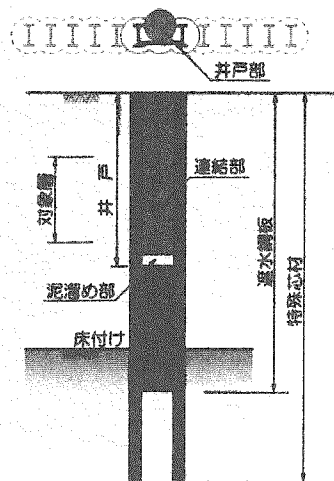
【施工手順】

①通水S MW壁の施工



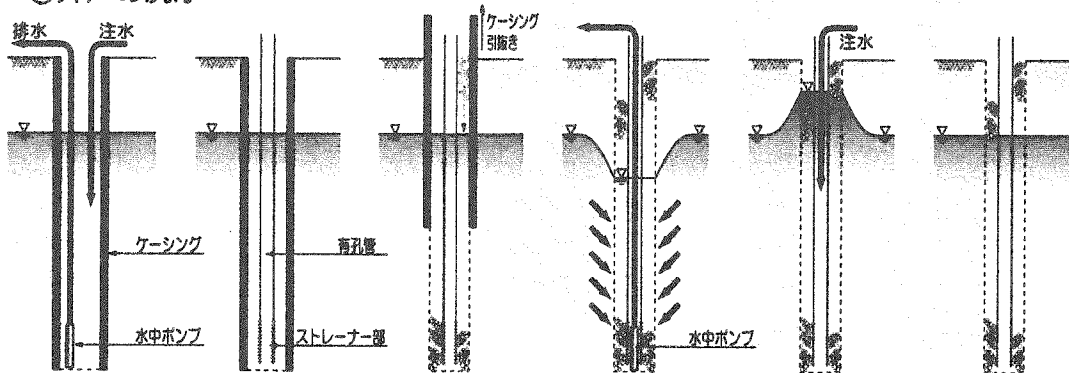
通水S MW壁は、連続する3孔の両端に特殊芯材、その間に遮水鋼板を設置します。遮水鋼板は根切り時の止水性を確保するために設置します。設置方法は、芯材施工後に遮水鋼板を建込む「分離方式」と芯材・遮水鋼板を一体で建込む「一体方式」があります。

②井戸部の削孔



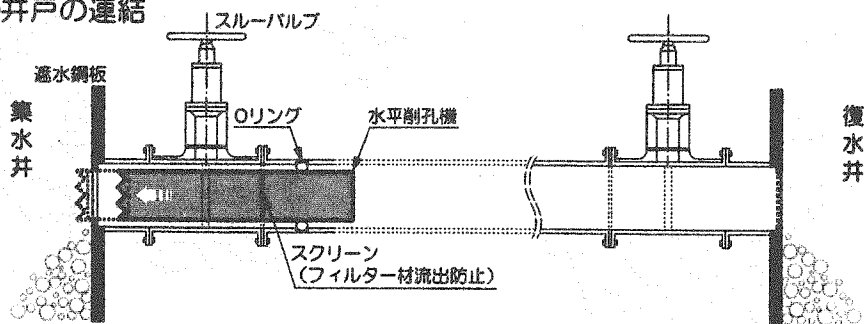
井戸部は、土留壁の影響のない地山側地盤と一部重なるように削孔します。

③井戸の洗浄



(1) 孔内水置換 (2) 有孔管設置 (3) フィルター材投入 (4) 逆洗浄 (5) 現場透水試験 (6) 定常状態
井戸の洗浄は井戸掘削地盤面の通水性を確保するために行います。

④井戸の連結



集水井と復水井とを連結させて地下水の流通を図ります。

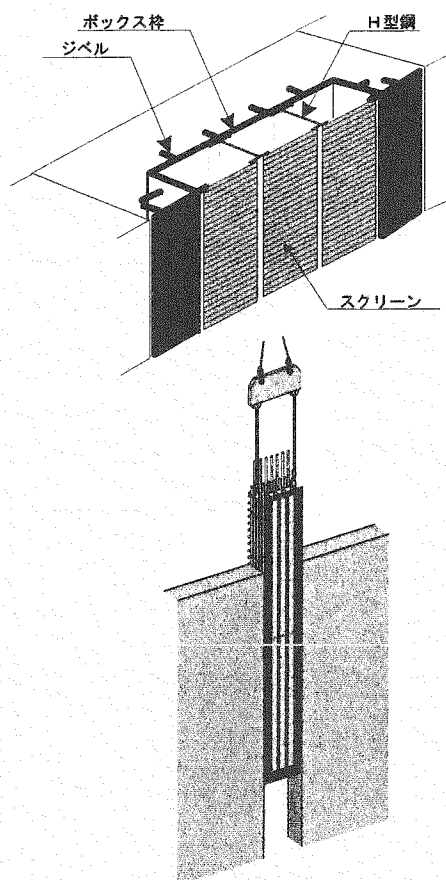
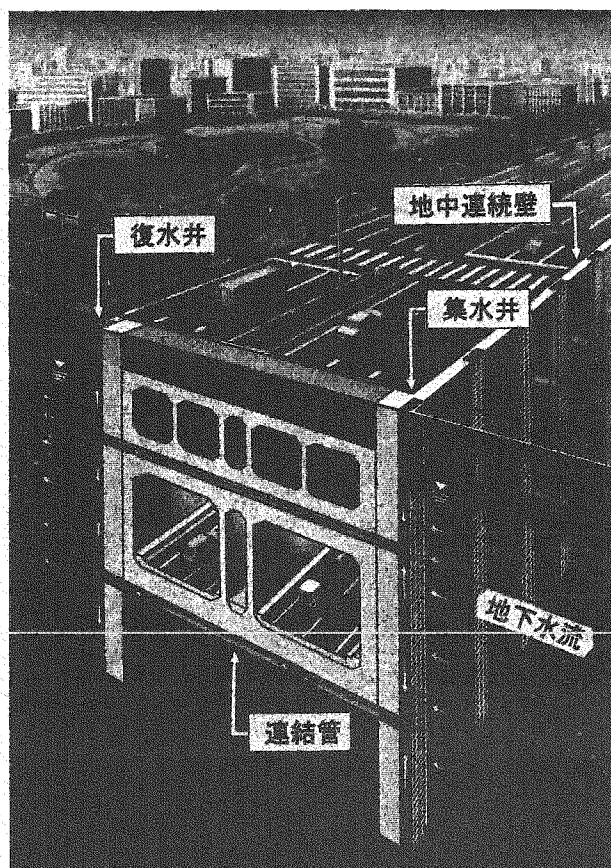
【特 許】

特開平 10-168872, 特願平 10-232656, 特願平 10-364112

地下水環境を破壊せず地下構造物建設を可能にする

通水RC連壁工法(EDW)

(Ecological Diaphragm Wall)



近年、地下空間利用の大型化・長大化によって環境形成の源となっている地下水系に大きな変化が生じるであろうことが懸念されています。大規模な地下空間建設にあたっては、建設時とともに完成後についても地下水の質・量ともに保全し、周辺環境に影響を与えないよう配慮しなくてはなりません。通水RC連壁(EDW)工法は、地下水系に与える影響が最も大きい「線状構造物を開削工法で構築する場合」を対象に「施工時には止水、完成後には通水」を可能とするRC地中連続壁工法です。

RC連壁内に止水と通水の両機能を備えた通水井(集・復水井)を設け、上流側と下流側の通水井を接続することによって地下水の流通を図ります。

【特徴】

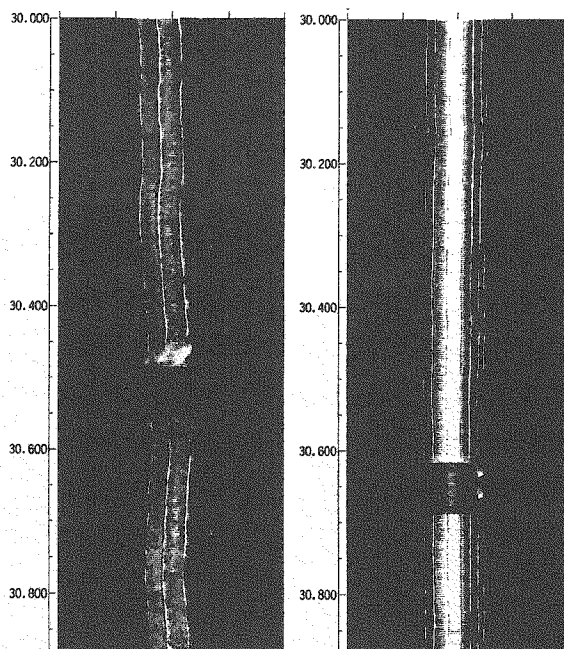
- ① RC地中連続壁内に通水井を設けるため、無駄な用地が必要ありません。
- ② 通水井は構造物として設計するため、本体壁としての利用が可能です。
- ③ 通水井は深さ方向に連続しているため、安定した地下水の流通が図れます。
- ④ 通水井はRC地中連続壁との同時施工のため、工期に影響を与えません。
- ⑤ 自然流下による地下迂回方式採用のため、維持管理が容易です。

【施工方法】

通水RC連壁(EDW)工法は、一般的な地中連続壁の施工に加え、通水機能を確保するための施工が必要となります。

施工手順としては、まず、後行エレメント施工時に通水ボックス付き鉄筋かごを建て込みます。次に、連壁コンクリートの打設と通水井地盤面の洗浄を行います。その後、山留め内を掘削し、集水井と復水井を連結し地下水を流通可能な状態にします。最後に、通水地盤面の再洗浄と中詰め材を投入して完成となります。

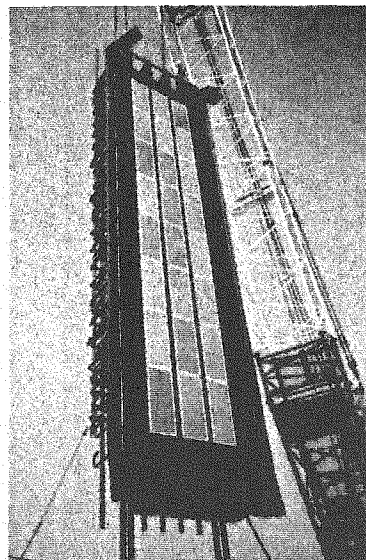
通水井は、ボックス枠(鋼板)と、コンクリートと一体性を持たせるためのシベル、スクリーンとそれを支持するH型鋼から成り立っています。スクリーンはステンレス鋼を用いた水平連続Vスロット構造としています。また、通水機能を確保するためには溝壁面の十分な洗浄が必要となります。洗浄は特殊なジェット洗浄装置により行います。この装置から出されたジェット水流は、Vスロット構造のスクリーンに衝突し、様々な角度から通水地盤面に作用するとともに地盤内に渦を発生します。これらの作用により、泥膜の破壊と地盤の細粒分の流出を容易にすることで地盤の通水性を回復することができます。



洗浄前

洗浄後

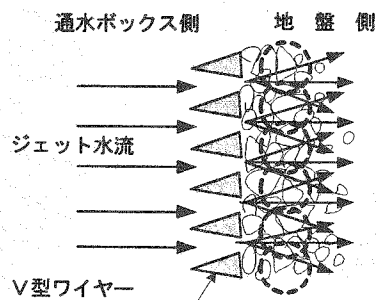
洗浄前と後のスクリーンの状況



ボックス枠建込み状況



ジェット洗浄装置



ジェッティングによる洗浄状況

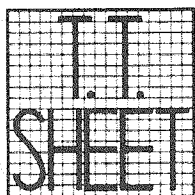
【特 許】

特許第 2611104 号 (連続地中壁における通水工法)

八千代エンジニアリング株式会社
株式会社銭高組

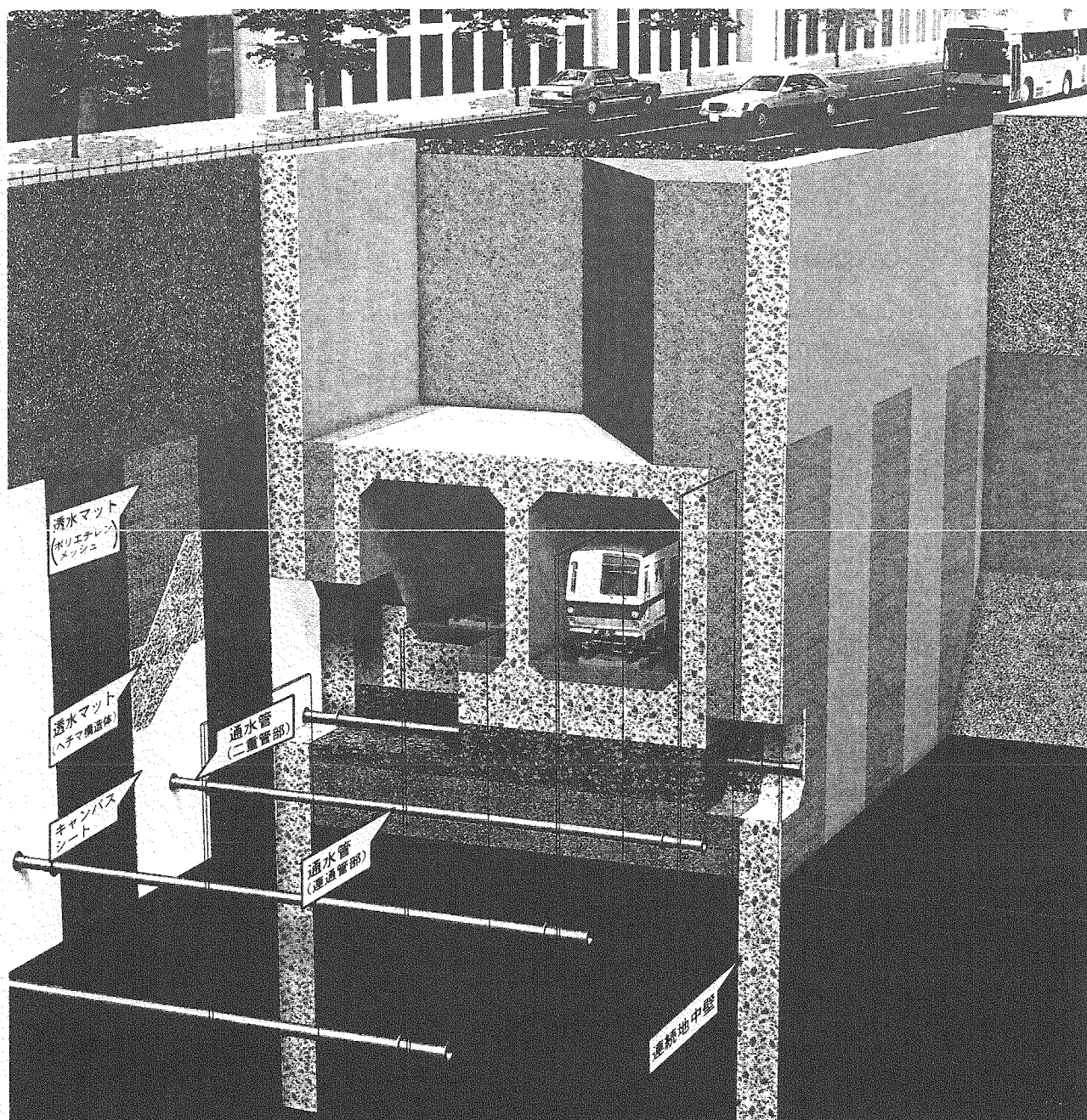
東京都目黒区中目黒 1-10-21
東京都千代田区一番町 31 番地

03-3715-1231
03-5323-3861



大成テクニカルシート

地下水脈を遮断しない バイオ通水連壁工法



■ バイオ通水連壁工法の特長

- 環境にやさしい・・・地下水の流れを止めることがありません。
- 適用範囲が広い・・・地下水層がどの深さにあっても対応可能です。
地下水層と不透水層が互層になっていても対応可能です。
- 断面欠損がない・・・透水マットがキャンパスシートの外側にあるため、連壁本体の断面欠損がありません。
- 省力化・・・連壁完成後のはつり工事、穴開け工事等が必要ありません。
- 低コスト・・・従来のディープウェル・リチャージ工法等に比べ、設置費が低減できます。
- メンテナンスが容易・・・長期間使用により透水マット部に目詰まりが発生した場合でも、エアブロー等により簡単に回復させることができます。

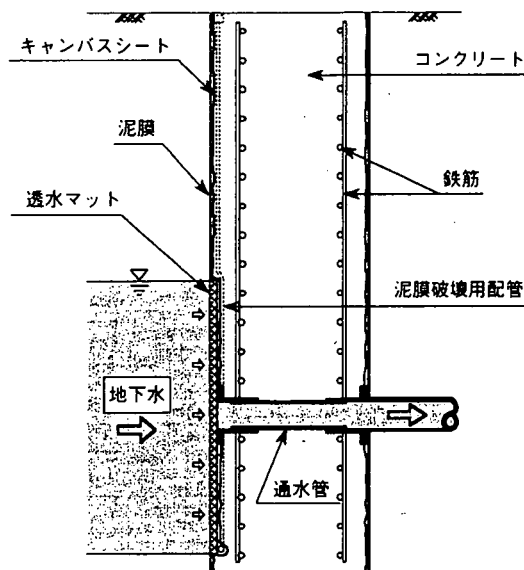
■ 概要

地下の長い区間に連続地中壁を設置すると地下水の流れが遮断され、上流側では立木の根腐れや地下室への浸水、下流側では井戸涸れや地盤沈下などの問題が発生する場合があります。

本工法は連壁に通水機能を持たせたことを特長としており、これらの問題の発生を防止することが可能です。

■ 通水部の構造

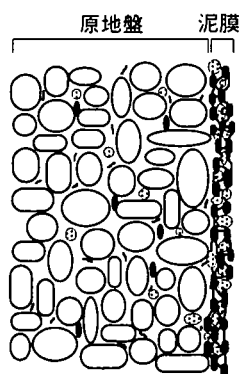
- ①連壁の外側面に透水マットを設置します。
- ②透水マットの間を通水管で接続します。
- ③連壁内に埋込まれる通水管は、二重管構造で連壁コンクリート打設時に、打設圧により透水マットと共に外側にスライドし、透水マットが地山に密着します。
- ④連壁完成後透水マットを利用して、分解酵素・エアブロー・逆圧力载荷などにより、連壁構築時に溝壁面にできた泥膜を破壊し、通水性を向上させます。
- ⑤地下水を透水マットで集水し、通水管を通して下流側に流し、再び透水マットにより効率良く地盤に戻します。



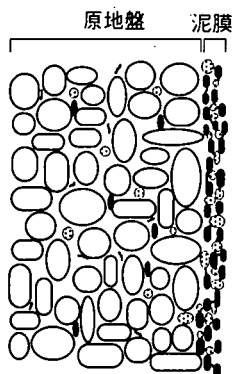
通水部構造図（集水側）

■ 泥膜破壊のイメージ

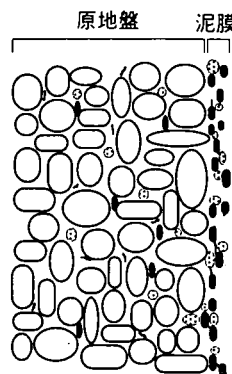
凡例
 ● : ベントナイト粒子
 / : ポリマー(CMC)粒子
 ⊙ : 原地盤の細粒分粒子
 ○ : 原地盤の粗粒分粒子



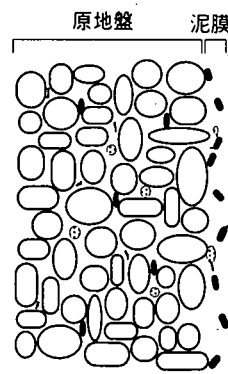
1. 泥膜形成後



2. 酵素分解後



3. エアブロー後



4. 逆圧力载荷後



大成建設株式会社

〒163-06 東京都新宿区西新宿1-25-1 ☎03(3348)1111(大代表)

地下水流動保全工法マニュアル(試案)

2001年1月31日 印刷

2001年2月1日 発行

発行者 地下水地盤環境に関する研究協議会

大阪市西区立売堀4丁目3番2号

(財)地域地盤環境研究所内

TEL (06) 6539-2973

印刷所 株式会社 淀川工技社

大阪市中央区大手通1丁目2番1号

TEL (06) 6943-8765

地下水地盤環境に関する研究協議会
大阪市西区立売堀4丁目3番2号
(財)地域地盤環境研究所内